



**Universidade de
Aveiro**
2014

Departamento de Engenharia Civil

**André Filipe de Sá
Guimarães**

ENSAIOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO IMPACTO DE UM ESPORÃO



**Universidade de
Aveiro
2014**

Departamento de Engenharia Civil

**André Filipe de Sá
Guimarães**

ENSAIOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO IMPACTO DE UM ESPORÃO

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, e coorientação científica do Doutor Fernando Francisco Machado Veloso Gomes, Professor Catedrático da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade do Porto.

o júri

presidente

Prof. Doutora Ana Luísa Pinheiro Velosa

professora associada do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Doutora Raquel Castro Alves Ferreira da Silva

investigadora pós-doutoramento na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho

professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

A todas as pessoas que contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação, a todas as pessoas que me acompanharam e ajudaram durante o meu percurso académico, que partilharam conhecimentos e visões, um especial obrigado.

Ao professor Carlos Coelho, por todas as discussões, pelo tempo cedido para esclarecimentos, pela orientação académica e pelas oportunidades proporcionadas.

À Márcia Lima pelas discussões, esclarecimentos, explicações e correções.

Ao professor Veloso Gomes por todo o apoio fornecido durante a minha estadia no laboratório de hidráulica da Universidade do Porto.

Ao Eurico Correia, por todos os momentos bem passados, pela indispensável ajuda em laboratório e tratamento de figuras para a tese e pela companhia nas noites no DEC.

Ao Bernardo Limas pela ajuda em laboratório, pelas incessáveis leituras da minha dissertação, por todos os momentos dentro e fora da Universidade.

Aos meus pais, que me aturaram em todos os momentos, por todo o apoio incondicional, paciência, estímulo e por todos os sacrifícios feitos para a concretização dos meus sonhos.

Aos meus avós que sempre me incentivaram sem dúvidas do meu empenho, da minha dedicação e do meu rumo.

Aos meus tios por todo o carinho, apoio e disponibilidade cedida ao longo destes 5 anos.

À Eliana por todas as palavras de apoio, incentivo, motivação, confiança, pela companhia em todos os momentos, por tudo o que representa para mim.

A todos os meus colegas sempre presentes pelo departamento nos longos dias de trabalho, noites incessantes no departamento, risadas e momentos de descontração.

palavras-chave

Esporão, modelação física com fundos móveis, LTC, Pelnard-Considère, configuração de equilíbrio.

resumo

Com os graves problemas de erosão costeira e a situação económica vivida em Portugal, torna-se essencial o estudo da adequabilidade das obras de defesa costeira às diversas situações costeiras existentes, antecipando os impactos a barlamar e sotamar das intervenções.

O estudo da morfodinâmica de praias permite identificar a posição da linha de costa e a sua evolução ao longo do tempo, na presença de estruturas de defesa costeira. Para a correta interpretação da evolução da linha de costa é necessário considerar a evolução da geometria dos perfis transversais constituintes da praia, bem como os fenómenos hidrodinâmicos e sedimentares presentes nos processos morfodinâmicos.

O aparecimento de ferramentas numéricas e analíticas simplificou bastante a avaliação dos impactos resultantes das intervenções de defesa costeira. No entanto, estas não dispensam a calibração com dados recolhidos em campo e em laboratório. A recolha de dados em campo é difícil, recorrendo-se cada vez mais a ensaios laboratoriais a uma escala reduzida. No entanto, os ensaios laboratoriais também possuem limitações, podendo não reproduzir fielmente os fenómenos hidrodinâmicos e morfo-sedimentares existentes.

Este trabalho teve como principal objetivo o estudo da evolução morfodinâmica da linha de costa e dos perfis transversais a barlamar de um esporão, analisando o modelo analítico de Pelnard-Considère (1956), o modelo numérico LTC e ainda avaliando o resultado de trabalho laboratorial a uma escala reduzida. Realizou-se também, uma análise de sensibilidade aos parâmetros intervenientes nos dois modelos utilizados.

Observou-se que a geometria da linha de costa, segundo a formulação analítica, é bastante diferente da obtida no LTC. Pelnard-Considère (1956) define equilíbrio para um instante de tempo infinito, onde toda a linha de costa atinge uma posição paralela à inicial, afastada desta de uma distância igual ao comprimento do esporão, enquanto no LTC a praia atinge uma configuração de equilíbrio para um instante de tempo reduzido, com uma configuração final muito distinta da formulação analítica, dependente de efeitos de refração da agitação durante o processo de enchimento do esporão.

Nos ensaios laboratoriais realizados para uma praia com esporão foi possível identificar uma geometria de equilíbrio para os perfis transversais analisados, a partir de uma diminuição das taxas médias das diferenças de cotas e da estabilização dos valores das áreas dos perfis.

keywords

Groin, physical modeling with movable beds, LTC, Pelnard-Considère, equilibrium configuration

abstract

Due to the severe coastal erosion problems and economic situation in Portugal, it becomes essential the suitability study of the coastal defense structures to the existing coastal situations, foreseeing the updrift and downdrift impacts of the interventions.

The beach morphodynamics study allows to identify the shoreline position and its evolution over time with the presence of coastal defense structures. For the correct interpretation of the shoreline evolution it is necessary to consider the beach cross-shore profiles geometry evolution, as well as the hydrodynamic and sedimentary phenomena present in the morphodynamic processes.

The appearance of numerical and analytical tools has greatly simplified the assessment of the coastal defense interventions impact. However, these do not exempt calibration with the collected field and laboratory data. The field data is hard to collect, increasing the resort to laboratory tests at a reduced scale.

Nevertheless, the laboratory tests also have limitations and cannot accurately reproduce all the hydrodynamic and morpho-sedimentary phenomena.

This work aimed to study the morphodynamics evolution of the shoreline and the beach cross-shore profiles updrift of a groin, analyzing the Pelnard-Considère (1956) analytical model, the numerical model LTC and still analyzing the results of a laboratory work at a reduced scale. A sensitivity analysis was also carried out, analyzing the involved parameters influence on both used models.

It was observed that the shoreline geometry, according to the analytical formulation, is quite different from the one obtained through the LTC. Pelnard-Considère (1956), defines equilibrium for an infinite time, where the entire shoreline achieves a parallel position to the initial one, away from this of a distance equal to the groin's length, while in the LTC model the beach reaches the equilibrium configuration for a small running time, with a final configuration very different from the analytical formulation, dependent on the effects of the wave refraction during the groin filling process.

In the carried out laboratory tests for a beach with the presence of a groin, it was possible to identify the equilibrium geometry for the analyzed cross-shore profiles, from a decrease in the average rate of the profile heights difference and the stabilization of the cross-shore profiles areas.

ÍNDICES

Índice geral

Índice geral	xv
Índice de figuras	xix
Índice de tabelas	xxv
Abreviaturas e acrónimos	xxvii
Lista de símbolos	xxix
Letras latinas maiúsculas	xxix
Letras latinas minúsculas	xxx
Letras gregas	xxx
1. Introdução	3
1.1. Enquadramento e objetivos	3
1.2. Estrutura da tese	4
2. Dinâmica na envolvente dos esporões	9
2.1 Processos físicos	9
2.1.1. Morfodinâmica	9
2.1.2. Transporte sedimentar	11
2.1.3. Hidrodinâmica	13
2.2 Modelação física	14
2.2.1. Considerações de escala	15
2.2.2. Modelo hidrodinâmico de ondas curtas	15
2.2.3. Fundos móveis	16
2.3 Estudos de Silva (2010)	17
2.3.1. Descrição do protótipo	17
2.3.2. Descrição do modelo físico	18
2.4 Caso de estudo	20

3.	Formulação analítica de Pelnard-Considère (1956)	27
3.1.	Parâmetros considerados	27
3.2.	Análises de sensibilidade	29
3.2.1.	Tempo de análise e incidência da agitação	29
3.2.2.	Coeficiente de transporte (k)	30
3.3.	Evolução da linha de costa	36
3.4.	Comparação entre protótipo e modelo	39
4.	Modelação numérica com o LTC	45
4.1.	Descrição do modelo numérico	45
4.2.	Análises de sensibilidade	46
4.3.	Simulação à escala do protótipo	48
4.3.1.	Tempo de enchimento	48
4.3.2.	Equilíbrio	52
4.4.	Simulação à escala do modelo	55
4.4.1.	Tempo de enchimento	55
4.4.2.	Equilíbrio	58
4.5.	Comparação entre protótipo e modelo	61
5.	Modelação física em laboratório	67
5.1.	Procedimento geral	67
5.2.	Ensaio sem esporão	68
5.2.1.	Evolução do perfil transversal	70
5.2.2.	Perfil de equilíbrio	74
5.3.	Ensaio com esporão	76
5.3.1.	Evolução do perfil transversal	78
5.3.2.	Perfil de equilíbrio	81
5.3.3.	Linha de costa e área dos perfis	84

5.4.	Observações	85
6.	Análise de resultados e discussão	91
6.1.	Comparação Pelnard-Considère e LTC: escala do protótipo.....	91
6.2.	Comparação Pelnard-Considère, LTC e Laboratório: escala do modelo.....	95
6.2.1.	Configuração em planta.....	95
6.2.2.	Perfis transversais	99
6.3.	Comparação modelo e protótipo, com a aplicação das relações de escalas..	101
6.3.1.	Configuração em planta.....	101
6.3.2.	Perfis transversais	102
7.	Considerações finais	107
7.1.	Conclusões	107
7.2.	Desenvolvimentos futuros	109
	Bibliografia.....	115

Índice de figuras

Figura 2.1 - Possível esquema do processo de enchimento de um esporão num setor costeiro em situação de erosão (adaptado de Oliveira, 1997 e Silva, 2010)	12
Figura 2.2 - Ilustração do ponto de divergência, por efeito da difração.....	14
Figura 2.3 - Praia ensaiada por Silva (2010)	19
Figura 2.4 - Localização esquemática dos perfis transversais analisados	22
 Figura 3.1 - Exemplo da evolução da linha de costa, no tempo, baseado no modelo de Pelnard-Considère (1956), juntamente com o referencial a aplicar	27
Figura 3.2 - Posição da linha de costa, por aplicação da formulação de Pelnard-Considère (1956) a um esporão com 145m de comprimento	30
Figura 3.3 - Variação do valor de k segundo a expressão de Bailard (1981), em função da orientação da agitação ao largo, para um $d_{50}=0.5\text{mm}$	33
Figura 3.4 - Variação do valor de k , em função de α_b , para diferentes valores de d_{50} , segundo Bailard (1981)	34
Figura 3.5 - Coeficiente de transporte, k , em função do d_{50}	35
Figura 3.6 - Posição da linha de costa a barlar de um esporão, segundo Pelnard-Considère (1956)	36
Figura 3.7 - Evolução da largura da praia nos perfis transversais P1 a P9 segundo Pelnard-Considère (1956)	37
Figura 3.8 - Variação das diferenças entre larguras emersas dos perfis transversais P1 a P9, entre dois valores do coeficiente de transporte sedimentar	39
Figura 3.9 - Evolução da largura emersa relativa dos perfis, à escala do protótipo e do modelo, para o valor máximo do coeficiente de transporte, ao longo do tempo, segundo a formulação de Pelnard-Considère (1956).....	40
Figura 3.10 - Evolução da largura emersa relativa dos perfis, à escala do protótipo e do modelo, para o valor mínimo do coeficiente de transporte, ao longo do tempo, segundo a formulação de Pelnard-Considère (1956).....	41
 Figura 4.1 - Posição da linha de costa a barlar de um esporão, obtida pelo LTC, ao fim do tempo de enchimento, à escala do protótipo.....	49

Figura 4.2 - Diferenças registadas na largura emersa da extensão de praia entre dois instantes, à escala do protótipo.....	50
Figura 4.3 - Diferenças registadas na largura emersa da extensão de praia dois valores de k à escala do protótipo.....	51
Figura 4.4 - Perfis transversais para as combinações dos valores de k e tempos de enchimento, à escala do protótipo	52
Figura 4.5 - Evolução da linha de costa até ao alcance do equilíbrio, para dois valores de k , à escala do protótipo.....	53
Figura 4.6 - Posição da linha de costa em equilíbrio e respetivas diferenças, para dois valores de k , à escala do protótipo.....	54
Figura 4.7 - Evolução da largura da praia no protótipo, segundo o LTC.....	54
Figura 4.8 - Perfis transversais de uma praia em equilíbrio, segundo o LTC à escala do protótipo	55
Figura 4.9 - Posição da linha de costa a barlar de um esporão, obtida pelo LTC, ao fim do tempo de enchimento, à escala do modelo	56
Figura 4.10 - Diferenças registadas na largura emersa da extensão de praia entre dois instantes, à escala do modelo	56
Figura 4.11 - Diferenças registadas na largura emersa da extensão de praia dois valores de k à escala do modelo.....	57
Figura 4.12 - Perfis transversais para as combinações dos valores de k e tempos de enchimento, à escala do modelo.....	58
Figura 4.13 - Evolução da linha de costa até ao alcance do equilíbrio, para dois valores de k , à escala do modelo.....	59
Figura 4.14 - Posição da linha de costa em equilíbrio e respetivas diferenças, para dois valores de k , à escala do modelo	60
Figura 4.15 - Evolução da largura da praia no modelo, segundo o LTC	60
Figura 4.16 - Perfis transversais de uma praia em equilíbrio segundo o LTC (modelo)	61
Figura 4.17 - Evolução da largura emersa relativa dos perfis, à escala do protótipo e do modelo, para o valor máximo do coeficiente de transporte, ao longo do tempo, segundo o LTC	62

Figura 4.18 - Evolução da largura emersa relativa dos perfis, à escala do protótipo e do modelo, para o valor mínimo do coeficiente de transporte, ao longo do tempo, segundo o LTC.....	62
Figura 5.1 - Ferramentas utilizadas para a preparação da praia em laboratório.....	68
Figura 5.2 - Assentamentos após enchimento do tanque.....	68
Figura 5.3 - Ensaio sem esporão.....	69
Figura 5.4 - Perfil de Dean previsto como perfil inicial e os perfis transversais iniciais reais PT1 e PT2	69
Figura 5.5 - Representação da evolução dos perfis transversais, ao longo do ensaio sem esporão.....	70
Figura 5.6 - Identificação visual das bermas submersas no final do ensaio.....	71
Figura 5.7 - Taxas médias (t_z) das diferenças absolutas da altura (Δz) do perfil ao longo do ensaio, em ambos os perfis analisados nos pontos 1 e 22 (ensaio sem esporão)	72
Figura 5.8 - Diferenças médias absolutas das cotas dos perfis ao longo do tempo de ensaio, para ambos os perfis analisados.....	73
Figura 5.9 - Desvio padrão das diferenças médias absolutas (entre todos os pontos do perfil) ao longo do tempo de ensaio, para ambos os perfis analisados.....	73
Figura 5.10 - Representação do perfil PT1 e PT2 em situação de equilíbrio	74
Figura 5.11 - Comparação entre o perfil de equilíbrio obtido no final do ensaio e o perfil de Dean.....	74
Figura 5.12 - Formas do perfil de equilíbrio obtido para o primeiro ensaio	75
Figura 5.13 - Modelo físico da praia no início do segundo ensaio.....	76
Figura 5.14 - Perfis transversais no início do segundo ensaio	77
Figura 5.15 - Evolução temporal dos perfis transversais ao longo do segundo ensaio	79
Figura 5.16 - Taxas médias (t_z) das diferenças absolutas da altura perfil ao longo do ensaio, nos perfis P1 a P5	80
Figura 5.17 - Diferenças médias absolutas (entre todos os pontos do perfil) ao longo do tempo de ensaio, para ambos os perfis P1, P2, P3, P4 e P5	81
Figura 5.18 - Desvio padrão das diferenças médias absolutas (entre todos os pontos do perfil) ao longo do tempo de ensaio, para ambos os perfis P1, P2, P3, P4 e P5	81
Figura 5.19 - Perfis transversais no final do segundo ensaio, em situação de equilíbrio	82

Figura 5.20 - Perfis transversais alinhados pela interseção com a superfície livre da água, comparados com o perfil de Dean.....	82
Figura 5.21 - Formas do perfil de equilíbrio obtido para o segundo ensaio	83
Figura 5.22 - Evolução da linha de costa em planta, na zona dos perfis P1 a P5	84
Figura 5.23 - Área dos perfis transversais ao longo do ensaio.....	85
Figura 5.24 - Cavidades e assentamentos junto ao esporão	86
Figura 5.25 - Formas de fundo junto ao limite emerso da praia	86
Figura 5.26 - Calha para recolher sedimentos a sotamar do esporão	87
Figura 5.27 - Desalinhamento dos batedores	87
Figura 6.1 - Posição da linha de costa obtida pela formulação analítica de Pelnard-Considère (1956) e pelo LTC, após 39.95 anos	92
Figura 6.2 - Diferenças entre a formulação analítica e o LTC, à escala do protótipo, ao fim de 39.95 anos.....	92
Figura 6.3 - Evolução da largura emersa dos perfis P1 a P9, no protótipo, para $k=0.401$, num intervalo de tempo de 40 anos.....	93
Figura 6.4 - Evolução da largura emersa dos perfis P1 a P9, no protótipo, para $k=0.183$, num intervalo de tempo de 40 anos.....	94
Figura 6.5 - Posição da linha de costa, obtida pela formulação analítica de Pelnard-Considère (1956), pelo LTC e em laboratório, de k após 25000 horas para os modelos e após o alcance do equilíbrio da praia	95
Figura 6.6 - Diferenças entre a formulação analítica e o LTC, à escala do modelo, ao fim de 2.853 anos.....	96
Figura 6.7 - Evolução da largura emersa dos perfis P1 a P9, no modelo, para $k=0.713$, num intervalo de tempo de 2.853 anos.....	97
Figura 6.8 - Evolução da largura emersa dos perfis P1 a P9, no modelo, para $k=0.108$, num intervalo de tempo de 2.853 anos.....	98
Figura 6.9 - Configuração da linha de costa, à escala do modelo (situação de equilíbrio). 99	
Figura 6.10 - Perfis transversais na situação de equilíbrio, à escala do modelo	100
Figura 6.11 - Área total dos perfis em equilíbrio, no modelo numérico e no laboratório. 101	
Figura 6.12 - Posição da linha de costa para todos cenários de protótipo, com base nos perfis P1 a P5.....	102

Figura 6.13 - Perfis transversais P1 a P5 da praia modelada com a presença do esporão, numa situação de equilíbrio (modelo com escalas aplicadas)	103
Figura 6.14 - Áreas totais, para uma extensão de 3.70m, de cada perfil no modelo numérico do protótipo e o modelo físico com a relação de escalas aplicada	103

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades do fluido e do material sedimentar adotadas no caso de estudo	20
Tabela 2.2 - Geometria adotada para a área de estudo	21
Tabela 2.3 - Caracterização da agitação adotada no caso de estudo	21
Tabela 2.4 - Dimensões do esporão adotadas no caso de estudo	21
Tabela 2.5 - Valores adotados para a distância (x) entre os perfis selecionados e o esporão	23
Tabela 3.1 - Tempos de enchimento do esporão (t_f) para diferentes ângulos de agitação ao largo (α_o) e consequentes ângulos de rebentação (α_b)	30
Tabela 3.2 - Condições de agitação na rebentação, para um rumo da agitação de 10° e diferentes alturas de onda ao largo	33
Tabela 3.3 - Tempo de enchimento, em função dos coeficientes de transporte adotados (formulação de Pelnard-Considère, 1956).....	35
Tabela 3.4 - Diferenças máximas entre perfis e instantes onde são observadas	38

Abreviaturas e acrónimos

CERC	Coastal Engineering Research Center
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GENESIS	Generalized Model for Simulating Shoreline Change
JONSWAP	Joint North Sea Wave project
LH	Laboratório de Hidráulica
LTC	Long-Term Configuration
NB	Parâmetro de entrada no LTC (evolução do perfil, definição do tipo de batimetria)
SHRHA	Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente

Lista de símbolos

Letras latinas maiúsculas

A	Parâmetro da escala de sedimentos para a definição do perfil de Dean (1977)
B	Altura da berma na zona emersa
C_{bg}	Celeridade da onda na rebentação
D_f	Défice sedimentar (Oliveira, 1997)
D_*	Parâmetro adimensional de dimensão dos sedimentos (Van Rijn, 1984)
H_b	Altura de onda na rebentação
H_s	Altura de onda significativa
L_b	Comprimento de onda na rebentação
N_{LTC}	Parâmetro de escala entre as grandezas e propriedades físicas adotadas no modelo numérico LTC
N_{P-C}	Parâmetro de escala entre as grandezas e propriedades físicas adotadas no modelo analítico de Pelnard-Considère (1956)
N_x	Escala horizontal segundo a direção x (protótipo/modelo)
N_y	Escala horizontal segundo a direção y (protótipo/modelo)
N_z	Escala vertical segundo a direção z (protótipo/modelo)
Q_l	Caudal longitudinal (correntes)
Q_p	Caudal sólido potencial de transporte longitudinal
Q_e	Caudal sólido efetivo de transporte sedimentar (Oliveira, 1997)
Q_{es}	Caudal sólido efetivo de transporte longitudinal, assumindo que não existe passagem de areias até à saturação (Oliveira, 1997)
T	Período de onda
T_p	Período de pico de onda
V_a	Capacidade de retenção do esporão (Oliveira, 1997)
Y	Comprimento do esporão

Letras latinas minúsculas

d_b	Profundidade de rebentação
d_{50}	Diâmetro mediano dos sedimentos
g	Aceleração gravítica
h_c	Profundidade de fecho (limite inferior do perfil ativo)
k	Coeficiente de transporte sedimentar
k_b	Coeficiente de rebentação da agitação marítima
k_r	Coeficiente de refração da agitação marítima
k_s	Coeficiente de empolamento da agitação marítima
m	Parâmetro caracterizador da refletividade da praia para a definição do perfil de Dean (1977)
m'	Inclinação do perfil emerso de praia
n	Porosidade dos sedimentos
s	Densidade dos sedimentos
t	Instante de análise (tempo)
tc	Instante de construção do esporão
t_e	Tempo de alcance do equilíbrio da posição de linha de costa
t_f	Tempo de enchimento do esporão (Pelnard-Considère, 1956)
tz	Taxas médias das diferenças absolutas da altura do perfil ao longo do tempo de ensaio
t_2	Tempo de cálculo na expressão de Pelnard-Considère (1956) após o tempo de enchimento ter sido alcançado
u_{mb}	Velocidade orbital
x	Eixo horizontal segundo a direção x
y	Eixo horizontal segundo a direção y
z	Eixo vertical segundo a direção z

Letras gregas

α_0	Orientação da ondulação ao largo
α_b	Orientação da ondulação na rebentação

β	Ângulo dos fundos na zona de rebentação com a horizontal
δ_o	Declividade da onda ao largo (H_o/L_o)
Δx	Diferenças de comprimentos segundo a direção x
Δy	Diferenças de comprimentos segundo a direção y
Δz	Diferenças de alturas segundo a direção z
$\Delta x'$	Comprimento da praia modelada em laboratório e numericamente segundo a direção x
$\Delta y'$	Comprimento da praia modelada em laboratório e numericamente segundo a direção y
$\Delta z'$	Altura da praia modelada em laboratório e numericamente segundo a direção z
$\Delta z'_{emersa}$	Altura emersa da praia modelada em laboratório e numericamente segundo a direção z
ε	Parâmetro de calibração da expressão de Pelnard-Considère (1956)
ν	Viscosidade cinemática da água
ξ_o	Número de Irribarren
ρ	Massa volúmica da água
ρ_s	Massa volúmica dos sedimentos
\emptyset	Ângulo de atrito dos sedimentos
$\emptyset_{long.}$	Ângulo de atrito longitudinal dos sedimentos
ω_s	Velocidade de queda dos sedimentos

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1. Introdução

O trabalho desenvolvido consistiu no estudo do impacto dos esporões na praia a barlar, recorrendo a uma formulação analítica, a modelação numérica e a ensaios laboratoriais. Este capítulo define o enquadramento do tema da dissertação, os objetivos do trabalho e a estrutura do conteúdo do presente documento.

1.1. Enquadramento e objetivos

A construção de estruturas de defesa costeira tem como objetivo reduzir a erosão numa determinada extensão de praia, protegendo infraestruturas e bens. A análise do impacto das estruturas de defesa costeira deve considerar dois pontos de vista: o que se refere à estabilidade da linha de costa; e o que diz respeito à dinâmica sedimentar (Silva, 2010).

Muitas vezes, nas intervenções de defesa costeira são escolhidas estruturas perpendiculares à costa: esporões. Os esporões são as estruturas de estabilização da linha de costa, ligadas à terra, mais antigas e mais utilizadas. Contudo, são também aquelas que têm vindo a ser mais utilizadas inadequadamente, devido às limitações inerentes ao nível de conhecimento do complexo comportamento dinâmico de interação entre a agitação marítima e a evolução das praias. Aos esporões está associada uma incerteza na avaliação dos impactos relativamente aos fenómenos hidrodinâmicos resultantes da interferência com a agitação marítima, influências no transporte sedimentar e evolução dos perfis transversais a sotamar e barlar da estrutura (Silva, 2010). Assim os objetivos traçados para o desenvolvimento desta tese foram os seguintes:

- Baseado no modelo construído por Silva (2010), dimensionar e construir no laboratório de hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) um esporão, em escala reduzida;
- Avaliar no modelo a evolução do perfil transversal em situação de acreção persistente, quando sujeito a uma onda regular:
 - Tempo necessário para ser atingida a posição de equilíbrio;
 - Comportamento dos perfis transversais em função da distância ao esporão (análise do perfil ativo a barlar do esporão);
 - Evolução da linha de costa e de cada perfil ao longo do tempo, até ser atingida uma posição de equilíbrio;

- Fazer a simulação numérica, com recurso ao modelo LTC (Long-Term Configuration), desenvolvido por Coelho (2005), do comportamento da situação avaliada no modelo físico;
- Interpretar e comparar os resultados obtidos em modelo numérico e em modelo físico.

Para além dos objetivos traçados inicialmente foi feita a análise para protótipo e modelo da formulação analítica de Pelnard-Considère (1956), assim como a análise da definição de perfil transversal para uma praia em equilíbrio, em laboratório, sem a presença de qualquer tipo de intervenção costeira.

1.2. Estrutura da tese

Este trabalho encontra-se dividido em sete capítulos. Após uma breve descrição da funcionalidade dos esporões e dos objetivos a cumprir com o desenvolvimento do trabalho, segue-se o segundo capítulo, onde são apresentados todos os conceitos necessários à compreensão deste trabalho, essencialmente relacionados com fenómenos morfodinâmicos. Ainda nesse capítulo é feita uma descrição das várias considerações necessárias à execução de um modelo físico em laboratório, bem como do caso de estudo que serviu de base para a preparação da situação a analisar neste trabalho. São descritas todas as grandezas e propriedades físicas adotadas para os estudos em protótipo e em modelo.

No terceiro capítulo encontra-se a análise da evolução da linha de costa e dos perfis transversais, no modelo e protótipo definidos no capítulo anterior, segundo a formulação analítica de Pelnard-Considère (1956). São também desenvolvidas análises de sensibilidade a vários parâmetros necessários na aplicação desta formulação analítica.

O quarto capítulo apresenta um estudo semelhante ao realizado no terceiro capítulo, mas aplicado ao modelo numérico de estimativa da evolução da posição da linha de costa LTC, Long-Term Configuration (Coelho, 2005). Inicialmente também são realizadas análises de sensibilidade a alguns parâmetros do modelo numérico, seguindo-se uma análise da configuração da linha de costa em planta e da forma dos perfis transversais, para a situação semelhante à estudada no terceiro capítulo e para uma situação de equilíbrio da praia a barlar do esporão.

A componente laboratorial é apresentada no quinto capítulo, através de uma descrição dos ensaios realizados no tanque de ondas do laboratório de hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e dos resultados obtidos da monitorização dos perfis transversais, com a consequente análise e retirada de conclusões.

No sexto capítulo apresenta-se a comparação e discussão dos resultados obtidos pelas três vias de análise: analítica (através da formulação de Pelnard-Considère, 1956), numérica (através do modelo numérico LTC) e laboratorial (através do modelo físico realizado em laboratório).

O último capítulo apresenta todas as considerações finais sobre o trabalho realizado, bem como propostas para possíveis desenvolvimentos futuros deste trabalho.

Capítulo 2

DINÂMICA NA ENVOLVENTE DE ESPORÕES

2. Dinâmica na envolvente dos esporões

A configuração da linha de costa depende do transporte longitudinal de sedimentos e da sua granulometria, do clima de agitação marítima existente no local, da existência de estruturas de defesa costeira, entre vários outros aspetos (Coelho, 2005). Para proceder ao estudo do efeito de um esporão através da análise e comparação dos resultados da aplicação da formulação de Pelnard-Considère (1956), do programa de modelação numérica LTC e ainda de ensaios laboratoriais, realizados num modelo físico a uma escala reduzida, foi idealizado um caso de estudo, com base no trabalho de Silva (2010).

2.1 Processos físicos

A compreensão dos fenómenos físicos envolvidos é indispensável para a interpretação de resultados provenientes de campanhas de monitorização de campo e/ou laboratório, e consequente implementação dos resultados em modelos numéricos, aumentando a eficácia e a aproximação dos resultados à realidade (Coelho, 2005 e Taveira-Pinto *et al.*, 2007).

2.1.1. Morfodinâmica

As alterações de curto prazo na morfologia de praias incluem a resposta instantânea à ação direta de ondas, correntes, marés e sobreelevações de origem meteorológica, tal como, às alterações sazonais, entre períodos de maior e menor severidade de mar (Silva, 2010). Ondas de menor altura, com maior probabilidade de ocorrência no verão, movimentam a areia ao longo do perfil transversal, depositando sedimentos na praia. Segundo Komar (1998), os perfis transversais mais inclinados estão associados a períodos de menor severidade (acrecção), sendo por isso mais refletivos. Os perfis com menores inclinações estão associados a condições de agitação marítima mais energéticas, pois são mais dissipativos (permitem a dissipação de energia através do espraçamento).

A médio prazo as modificações importantes da morfologia de praias são a dinâmica de barras submersas e de crescentes de praia, ou a recuperação de um temporal excecional. As variações na morfologia são essencialmente devidas ao transporte sólido induzido pela obliquidade da agitação marítima na dissipação de energia sobre a praia (Silva, 2010). A importância da existência de uma barra submersa é significativamente superior quando existem períodos de maior agitação marítima, obrigando a que a rebentação das ondas

ocorra mais afastada da linha de costa, evitando assim uma maior remoção de sedimentos dos fundos.

Outro parâmetro associado à forma do perfil é a dimensão dos sedimentos que constituem a praia. Os sedimentos mais grosseiros possuem um índice de vazios superior ao de sedimentos mais finos, permitindo aumentar a percolação da água, além de possuírem um maior peso e rugosidade (maior ângulo de atrito). Estas características permitem a dissipação de mais energia das ondas, oferecendo uma maior resistência ao seu transporte e início de movimento (Bascom, 1951).

Na definição de forma de perfil torna-se importante a definição de perfil de equilíbrio. Segundo Morang e Parson (2002), o conceito de perfil de equilíbrio é fundamental em engenharia costeira, facilitando a interpretação de diversos fenómenos e a criação de relações de projeto. No entanto, na realidade, só se observaria um perfil de equilíbrio caso todos os parâmetros que entram na configuração da geometria dos perfis (*e.g.* granulometria, agitação marítima) se mantivessem constantes ao longo do tempo.

Bruun (1954), com base no estudo de perfis na Dinamarca e em Monterey Bay (Califórnia), assumindo que a dissipação de energia das ondas é uniforme, obteve uma expressão para a geometria de um perfil transversal em equilíbrio (equação 2.1). A expressão representa a profundidade de um determinado ponto, em função da distância à linha de costa em nível médio, de um parâmetro m representativo do tipo de dissipação da praia em análise, e de um parâmetro A de escala dos sedimentos. A representatividade desta expressão foi confirmada por Dean (1977), a partir da análise de diversas praias da costa do golfo do México e da costa este americana.

Kraus *et al.* (1998), bem como Morang e Parson (2002) e Coelho (2005), definem perfil ativo de uma praia como a largura de um perfil transversal, onde ocorrem processos de transporte sedimentar devido à ação de uma onda com uma determinada altura e período, originando alterações na batimetria. Quanto maior for a altura da onda maior será a extensão do perfil ativo, conseguindo, deste modo, movimentar sedimentos a uma maior profundidade. À zona mais profunda do perfil ativo, onde se observa o início do transporte das partículas, chama-se profundidade de fecho. O limite superior do perfil ativo é definido pela cota máxima de espraçamento, que indica até onde os sedimentos podem ser movidos. Quando existe um gradiente no transporte longitudinal, é comum a hipótese de que o perfil avança ou recua uniformemente em toda a extensão ativa do perfil. Deste modo, o volume

de sedimentos pode ser somado ou removido do perfil, sem alterar a sua forma (Coelho, 2005).

$$z=A y^m \quad (2.1)$$

A definição do perfil ativo tem bastante interesse do ponto de vista da distribuição transversal do transporte longitudinal, assim como da sua interação com estruturas de defesa costeira perpendiculares à costa (*e.g.* esporões e quebramares). Como os elementos perpendiculares à linha de costa interrompem, total ou parcialmente, o transporte sedimentar, para uma análise a curto, médio e longo prazo dos seus efeitos, interessa saber o caudal sólido que efetivamente passa por estas obras (à frente da cabeça da obra, mas dentro do perfil ativo), ficando disponível a sotamar.

2.1.2. Transporte sedimentar

Pode-se separar o transporte sedimentar em duas componentes direcionais: transporte transversal e transporte longitudinal, relativamente à orientação da linha de costa (Silva, 2010). Ambas as componentes influenciam o comportamento do perfil transversal. A componente longitudinal, associada à (in)disponibilidade de sedimentos, permite identificar se a praia em análise se encontra em erosão ou acreção, enquanto a componente transversal se encontra associada à variação da sua geometria.

As correntes longitudinais, criadas pela ondulação, são o principal meio de transporte sedimentar. A rapidez de observação dos fenómenos de acreção a barlamar de um esporão é definida pela corrente e pelo volume de sedimentos disponíveis para transporte. A ocorrência de correntes longitudinais fortes, juntamente com a não existência de sedimentos disponíveis para deposição, poderá levar a uma erosão acelerada da praia a sotamar dos esporões, bem como a uma alteração das cotas da praia imediatamente a barlamar, devido a sedimentos provenientes de uma zona de praia ainda mais a barlamar.

A distribuição do caudal sólido longitudinal ao longo do perfil transversal depende da altura da onda, do tipo de rebentação e da direcção de incidência da onda. Estes dois parâmetros definem a energia total transmitida aos sedimentos dos fundos e a sua capacidade de os mover (Rosati *et al.*, 2002). A onda liberta mais energia no momento da rebentação, pelo que é normal que na zona de rebentação exista um maior volume de sedimentos mobilizados, exceto quando se trata de rebentação progressiva (Coelho, 2005).

Os esporões, quando impermeáveis, poderão reter quase todos os sedimentos transportados longitudinalmente, que circulam na zona do perfil ativo abrangido pelo comprimento do esporão, podendo deixar passar os sedimentos na zona do perfil ativo não obstruída pela estrutura. De acordo com Oliveira (1997) a reposição da totalidade do transporte sólido para sotamar só será conseguida após o preenchimento da zona a barlar, ou seja, quando a capacidade de armazenamento de sedimentos do esporão for atingida. O comportamento de acumulação de sedimentos, a barlar de um esporão, está representado genericamente na figura 2.1. Este autor afirma que o efeito de retenção de sedimentos a barlar do esporão é transitório, pois depende de vários fatores, como características médias da agitação, morfologia da zona envolvente da obra, regimes de níveis de maré, comprimento do esporão, granulometria das areias, entre outros. Como tal, a avaliação do período de tempo durante o qual o esporão agrava o processo erosivo, (enquanto o caudal sólido que passa pelo esporão é insuficiente para compensar os fenómenos de erosão a sotamar) torna-se praticamente impossível, se analisado com muito detalhe.

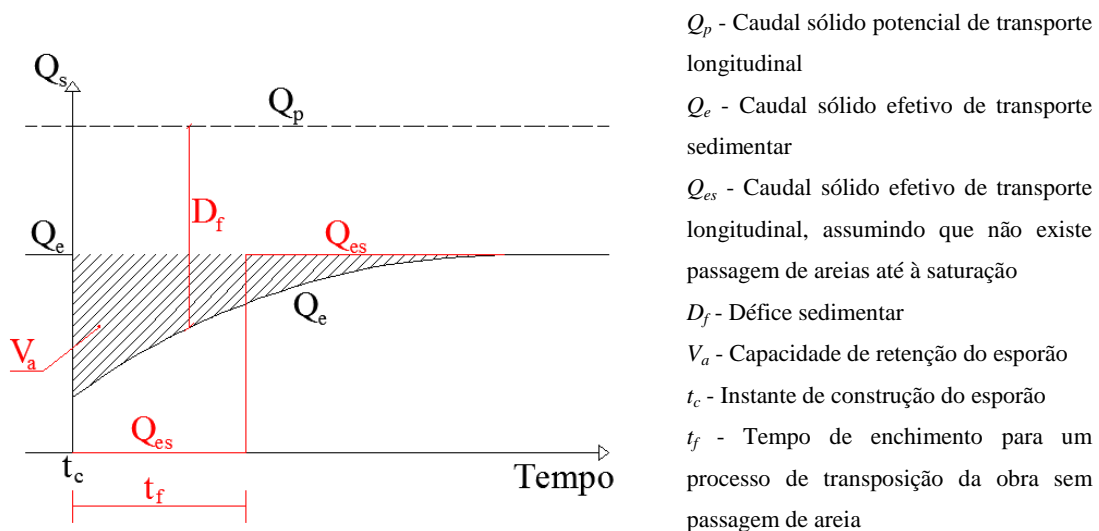


Figura 2.1 - Possível esquema do processo de enchimento de um esporão num setor costeiro em situação de erosão (adaptado de Oliveira, 1997 e Silva, 2010)

Outros autores, como Badiei *et al.* (1994), afirmam que existirá a possibilidade dos sedimentos transportados longitudinalmente serem projetados por correntes de retorno (criadas na zona protegida a sotamar do esporão) para grandes profundidades, acabando por saírem da zona ativa do perfil, ficando indisponíveis para se depositarem a sotamar do esporão. Oliveira (1997) não descarta essa possibilidade, mas indica que tal facto só se observa em determinadas condições de agitação marítima e nível da superfície da água.

Um pormenor a favor da teoria de que a formação de correntes de retorno não provoca a projeção de sedimentos para *offshore*, é a não observação de barras submersas, de carácter permanente e irreversível, junto ao limite do perfil ativo (Oliveira, 1997). A presença de correntes de retorno, juntamente com o défice de sedimentos, poderão ser os principais processos de erosão a sotamar de esporões (Van Rijn, 2011).

2.1.3. Hidrodinâmica

A hidrodinâmica costeira engloba uma variedade de processos ligados à propagação das ondas em direção à costa: refração; difração; reflexão; empolamento; e a eventual rebentação da onda. Segundo Gourlay (1976), as correntes longitudinais são produzidas por dois mecanismos: a incidência oblíqua das ondas sobre a linha de costa (correntes longitudinais uniformes) e a variação da altura das mesmas (correntes longitudinais não uniformes). Bowen e Inman (1969) demonstraram que quando as ondas incidem sobre o esporão com um determinado ângulo, observam-se fenómenos de reflexão e difração (sendo a difração o fenómeno com mais relevância a sotamar de esporões), produzindo um campo de ondas de menor altura que origina correntes longitudinais. As correntes criadas fluem em direção ao esporão, devido à transferência lateral de energia para a zona abrigada pelo esporão, que as reflete para *offshore*, originando as chamadas correntes de retorno adjacentes a sotamar do esporão. O ponto de divergência representa o limite entre a zona abrigada e a zona exposta (sotamar do esporão) e é consequência do gradiente entre ondas das duas zonas (Pattiaratchi, 2009 e Rocha, 2011), como se observa na figura 2.2. Estas correntes podem ser as principais causadoras dos fenómenos de erosão a sotamar, projetando os sedimentos para *offshore* e acabando por levar à rotura do pé ou enraizamento do esporão. A ocorrência, tamanho e força das correntes de retorno é determinada essencialmente pela batimetria da praia, clima de agitação marítima (altura de onda, período e direção), nível da água e dimensões do esporão.

Oliveira (1997) afirma que quanto menor for o nível de maré, mais afastada do esporão será a zona de rebentação e vice-versa. Se a rebentação ocorrer mais afastada do esporão, também as consequentes correntes longitudinais serão formadas mais longe da cabeça do esporão, ou seja, a influência da presença do esporão (barreira física) será menor, não alterando muito a direção das correntes. O oposto acontece quando a rebentação ocorre mais perto da linha de costa, originando correntes que acabam por colidir com o esporão,

gerando assim uma acentuada mudança de direção, para *offshore*, podendo então ter um maior impacto na projeção do caudal sólido para *offshore*.

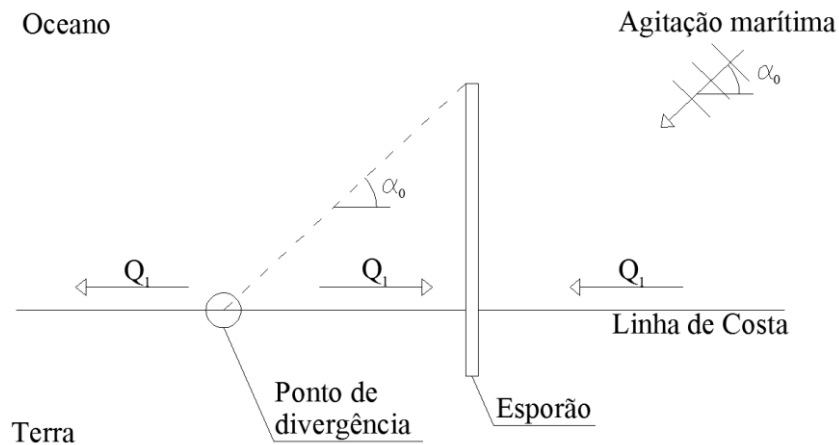


Figura 2.2 - Ilustração do ponto de divergência, por efeito da difração

2.2 Modelação física

A modelação física é uma parte importante no projeto de obras de proteção costeira e indispensável para a correta interpretação de fenómenos hidrodinâmicos e morfo-sedimentares que ocorrem em praias com, ou sem, a presença de estruturas costeiras. Segundo Antunes-Carmo (2004) existem muitos problemas reais para os quais não existem soluções analíticas e numéricas precisas o suficiente para prescindir da modelação física. Contudo, a modelação física não consegue traduzir com a precisão necessária muitos dos fenómenos que ocorrem no meio hídrico, nomeadamente nas zonas de rebentação, onde estão em causa escoamentos fortemente turbulentos, processos sedimentares e a evolução de fundos móveis (Moraes, 2010).

Taveira-Pinto *et al.* (2007), afirmam que os principais objetivos do recurso à modelação física estão essencialmente relacionados com a obtenção de informação qualitativa de fenómenos não descritos ou não compreendidos (parcial ou totalmente) e dados para a calibração, verificação ou rejeição de uma aproximação teórica e/ou numérica. A modelação física é vantajosa, relativamente às observações de campo, pois apresenta custos razoáveis e controláveis (as observações e medições feitas no campo são bastante dispendiosas quando se trata de uma zona costeira bastante energética). Os fenómenos hidrodinâmicos e sedimentares que ocorrem podem ser controlados (controlo das diversas variáveis envolvidas) e monitorizados com alguma precisão, permitindo facilitar a compreensão dos processos físicos e a obtenção de resultados qualitativos.

2.2.1. Considerações de escala

Sendo impossível a elaboração de modelos à escala real, existe a necessidade de diminuir dimensões e outras propriedades para que sejam exequíveis em laboratório. Dever-se-ia tentar alcançar uma semelhança hidráulica completa entre o modelo e o protótipo, dos números índices de Froude, Reynolds, Euler, Strouhal, Weber e Cauchy, respetivamente, quocientes entre a grandeza das forças de inércia e as grandezas das forças gravíticas, de viscosidade, de ações devidas a variações de pressão, de forças pulsatórias, de ações de tensão superficial e de forças de elasticidade intervenientes no fenómeno em estudo (Veloso-Gomes, 1995 e Heller, 2011). No entanto, a maior parte das vezes, os critérios de semelhança não podem ser totalmente cumpridos, existindo a necessidade de avaliar a legitimidade das conclusões retiradas a partir dos resultados do modelo (Novais-Barbosa, 1985). As técnicas mais utilizadas na modelação física de fenómenos hidráulicos naturais selecionam as semelhanças incompletas mais adequadas às ações predominantes nesses fenómenos (Veloso-Gomes, 1995). Comummente, a distorção é necessária para acomodação do modelo ao espaço disponível à realização do ensaio, bem como para reduzir custos de operação (Ranasinghe *et al.*, 2006). A distorção geométrica, para além de reduzir o espaço ocupado e custos, deverá apenas ser utilizada para acentuar declives (da superfície livre ou dos fundos) tornando-os mais facilmente mensuráveis, a fim de acomodação de critérios de semelhança adicionais (como o diâmetro dos sedimentos em modelos de transporte sedimentar) e a redução dos efeitos de escala (como de tensão superficial, que podem surgir em modelos de profundidades muito reduzidas, ou garantir que os escoamentos mantêm o carácter turbulento).

2.2.2. Modelo hidrodinâmico de ondas curtas

Os modelos hidrodinâmicos de ondas curtas tentam reproduzir campos de agitação marítima e correntes, bem como a sua interação com uma dada batimetria ou com estruturas costeiras. Tem como principal objetivo a adequada reprodução dos fenómenos de propagação das ondas, como o empolamento, refração, dissipação junto ao fundo, reflexão, difração e rebentação. A definição de "ondas curtas" está relacionada com os períodos característicos dos fenómenos ondulatórios, sendo caracterizada por períodos entre 1s e 25s e/ou baixas profundidades através da relação de profundidade sobre comprimento de onda, inferior a 0.05 (Dalrymple, 1989).

As ondas geradas propagam-se no interior do tanque, desde a zona de geração até encontrarem um obstáculo, ou uma praia, na qual são refletidas. Na natureza, as ondas refletidas propagam-se para o largo, mas no laboratório encontram as pás de geração, podendo ser novamente refletidas para o interior do tanque, interferindo com as ondas geradas e originando instabilidades. Atualmente, tenta-se minorar este efeito através de uma técnica de absorção ativa das ondas que atingem o sistema de geração, provenientes do interior do tanque. A utilização de praias dissipadoras (realizadas geralmente em cascalho e com declives suaves) junto às paredes do tanque pode ajudar a reduzir significativamente a reflexão das ondas incidentes. A propagação de ondas oblíquas junto a fronteiras físicas resulta na indução de correntes que se propagam longitudinalmente ao longo destas fronteiras, tal como acontece com a corrente de deriva litoral ao longo de praias. Num tanque de ondas fechado as correntes induzidas tendem a circular, podendo a sua indução, por um período longo de tempo, resultar em regiões de sobrelevação e subelevação da superfície livre. Este efeito de laboratório é importante em modelos de transporte sedimentar, tendo sido já desenvolvidas técnicas de recirculação para a sua redução (Visser, 1991).

2.2.3. Fundos móveis

Num modelo de fundos móveis a batimetria é materializada, total ou parcialmente, por material granular, que pode ser transportado pelas forças hidrodinâmicas mais relevantes, provocadas pelas ondas gravíticas e pelas correntes geradas. Os sedimentos respondem a estas ações, movendo-se junto ao fundo por arrastamento, ou sendo levantados na coluna de água e levados em suspensão pelo fluido, ou ainda, sendo mobilizados das duas formas em simultâneo (Silva, 2010).

Quase nunca é possível recriar condições ótimas na escolha dos sedimentos, visto que em muitos casos, devido à escala vertical, os mesmos deveriam ter uma dimensão tal que, para ser respeitada, ter-se-iam que utilizar materiais do tipo das argilas, que possuem coesão, enquanto os sedimentos que existem nas praias devem ser não-coesivos. Um modelo de fundos móveis, para além de ter em conta os fenómenos de transporte sedimentar no fundo, permite o aparecimento de formas de fundo, retratando os fenómenos de atrito junto ao mesmo limite para uma mais correta representação do efeito da ondulação.

Para o sucesso da modelação física com fundos móveis (correta reprodução de todos os processos que ocorrem na zona de rebentação), Dean (1985) recomenda que se garanta a semelhança geométrica do modelo, reproduzindo os processos hidrodinâmicos pela semelhança de Froude (desprezar efeitos viscosos, de tensão superficial e coesão) e utilizando areia como material sedimentar no modelo. A utilização de materiais mais leves resulta em acelerações inferiores das partículas no modelo, e consequentemente, em taxas de transporte inferiores, e com criação exagerada de zonas de acumulação de partículas. Nos modelos em que o tamanho dos sedimentos não é reproduzido de acordo com a escala geométrica (vertical), as forças requeridas para o movimento das partículas serão exageradas e as formas de fundo não serão as corretas (Mogridge e Kamphuis, 1972, Kamphuis, 1985 e Oumeraci, 1999).

Dean (1985), referiu que a semelhança do parâmetro de Shields não é importante em processos sedimentares junto à costa porque a mobilização dos sedimentos é feita pela turbulência das ondas na rebentação e não pela tensão de corte junto ao fundo.

2.3 Estudos de Silva (2010)

Na perspectiva de se recriar um cenário para análise do impacto morfológico de uma estrutura transversal à linha de costa, numa extensão de praia a barlar procedeu-se à avaliação das propriedades do cenário estudado por Silva (2010), desde as dimensões do esporão até ao tamanho dos sedimentos, tanto para a escala do modelo como para a do protótipo.

2.3.1. Descrição do protótipo

O protótipo que serviu de base para a elaboração do modelo físico de Silva (2010) foi um troço de praia que engloba uma estrutura transversal. A estrutura transversal, um esporão, possui 145m de comprimento e o trecho em análise encontra-se a sul da povoação da Vagueira, localizado no setor costeiro Barra-Mira. As condições de agitação marítima média caracterizam-se por uma altura de onda significativa entre 1m e 2m, um período de pico entre 8s e 12s, e uma direção de incidência da onda ao largo que descreve um ângulo de cerca de 10° com a orientação da linha de costa. O nível médio da água de mar é de +2m (ZH).

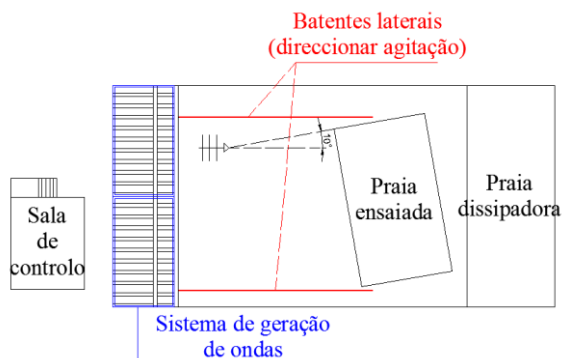
Para este trecho costeiro, o transporte sedimentar é assumido por vários autores (Bettencourt, 1997, Oliveira 1997 e Coelho, 2005) como tendo valores entre 1 a 2 milhões de m³/ano. Segundo Silva (2010), o caudal sólido estimado através da fórmula de CERC (1984), de acordo com a expressão 2.2, considerando um valor do parâmetro k (coeficiente de transporte sedimentar) de 0.22, para um índice de profundidade de rebentação (k_b) de 0.78, para uma altura de onda significativa (H_s) de 2m e uma direção de incidência ao largo (α_o) de 10°, é de cerca de 1.8 milhões de m³/ano.

$$Q_l = k \left(\frac{\rho \sqrt{g}}{16 k_b^2 (\rho_s - \rho) (1 - n)} \right) H_b^2 \sin(2\alpha_b) \quad (2.2)$$

O diâmetro mediano (d_{50}) das areias do trecho em análise foi caracterizado através de campanhas quadrimestrais realizadas durante 5 anos, definindo um valor de d_{50} de 0.5mm (Silva, 2010). Foi assumido que o perfil transversal da praia mantém uma configuração de equilíbrio na largura ativa do perfil, apresentando um declive regular na parte emersa de 0.05. Com base no registo fotográfico aéreo foi admitido que a estrutura transversal influencia de forma significativa a configuração da linha de costa, numa extensão de 500m a barlar e 500m a sotamar da obra. Para uma altura de onda significativa de 2m, Silva (2010) estimou que o perfil ativo deveria alcançar uma profundidade de 8.7m (com base nas conclusões de Roberts *et al.*, 2007).

2.3.2. Descrição do modelo físico

Os estudos de Silva (2010) foram executados no tanque de ondas do laboratório de hidráulica (LH) da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA) da Faculdade de Engenharia da Universidade do porto (FEUP). Este tanque possui 12m de largura, 28m de comprimento e profundidades máximas de 1.2m, e está equipado com um sistema de geração da agitação marítima constituído por vários batedores, incorporando um sistema de absorção dinâmica da reflexão. A praia foi preparada com a configuração demonstrada na figura 2.3, garantindo um ângulo de 10° de incidência da agitação ao largo, permitindo a utilização de todos os batedores e levando ao aparecimento de correntes longitudinais à praia.



a) Esquema em planta (adaptado de Silva, 2010)



b) Praia inicial, sem a presença de esporão, disponibilizada por R. Silva

Figura 2.3 - Praia ensaiada por Silva (2010)

O modelo físico da praia com esporão foi construído com a largura de 6.20m e uma dimensão longitudinal de 8.40m, com um declive médio de 0.03 (3%), para uma altura de água de 0.24m, com 0.16m de altura da zona emersa, perfazendo 0.40m de altura total. O intervalo de dimensões da areia seleccionada foi de 0.10 a 0.30mm, com um diâmetro mediano (d_{50}) de 0.27 mm. Silva (2010) optou por utilizar areia de quartzo de dimensões o mais reduzidas possível, de modo a que esta não possuísse coesão, e que, a relação com o diâmetro médio dos sedimentos no protótipo se afastasse o menos possível da escala vertical. Os sedimentos resultantes do transporte longitudinal foram recolhidos na zona mais a sotamar da praia (limite do tanque) para análise das taxas de transporte, através de uma vala que se estendia para além do comprimento do perfil transversal da praia. Silva (2010) utilizou uma agitação irregular, permitindo o aparecimento de ondas com altura superior à altura significativa (foi utilizado um espectro JONSWAP que se repetia após 650 ondas). O fluido utilizado no modelo foi água doce, com uma massa volúmica e viscosidade inferiores à água salgada.

Para garantir a semelhança dos processos hidrodinâmicos, o modelo devia ser não distorcido e obedecer à semelhança de Froude. Silva (2010) estudou as relações de escala, para modelos distorcidos de Le Méhauté (1970), Vellinga (1982), Hughes (1983) e Wang *et al.* (1990) e acabou por adotar as leis de Vellinga (1982), estabelecidas com base num grande número de testes em modelo físico, e recomendadas por Dean (1985) e Hughes (1993). As dimensões escolhidas para o modelo não respeitam os critérios de semelhança geométrica (modelo distorcido), pois a limitação das dimensões do tanque e a resolução dos equipamentos de medição (cerca de 1mm) conduziram à necessidade de distorcer o

modelo para garantir a leitura de valores aceitáveis, que pudessem ser transpostos através da relação de escalas para as dimensões do protótipo.

2.4 Caso de estudo

O caso de estudo deste trabalho foi definido com base no protótipo e no modelo adotados por Silva (2010), tendo em consideração toda a análise desenvolvida e todos os estudos de critérios de semelhança já resumidamente apresentados. Optou-se por definir um modelo com maior extensão do que o adotado no modelo de Silva (2010), tendo-se utilizado toda a extensão do tanque.

Nas tabelas 2.1 à 2.4 encontram-se todos os valores de propriedades do fluido e do material sedimentar, caracterização da agitação e dimensões adotadas para o caso de estudo a desenvolver à escala do protótipo e do modelo, para: os ensaios laboratoriais (Lab.); a análise pela formulação analítica (P-C) de Pelnard-Considère (1956); e o modelo numérico (LTC). Encontram-se nas mesmas tabelas as relações de escalas entre modelo e protótipo para a formulação analítica (N_{P-C}) e o estudo numérico (N_{LTC}).

Tabela 2.1 - Propriedades do fluido e do material sedimentar adotadas no caso de estudo

Grandeza	Modelo			Protótipo		Escala	
	Lab.	P-C	LTC	P-C	LTC	N_{P-C}	N_{LTC}
g (m/s ²)	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	1.00	1.00
ν (cm ² /s)	0.01	0.01	0.01	0.0119	0.0119	1.19	1.19
ρ (kg/m ³)	1000	1000	1000	1027	1027	1.03	1.03
ρ_s (kg/m ³)	2650	2650	2650	2650	2650	1.00	1.00
s	2.65	2.65	2.65	2.58	2.58	0.97	0.97
d_{50} (mm)	0.27	0.27	0.27	0.5	0.5	1.85	1.85
\emptyset (°)	-	-	30	-	30	-	1.00
$\emptyset_{long.}$ (°)	-	-	15	-	15	-	1.00
n	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	1.00	1.00
ω_s (m/s)	0.0349	0.0349	0.0349	0.0622	0.0622	1.78	1.78

Como se observa na tabela 2.2, a profundidade de fecho definida no LTC, é inferior à do modelo analítico. A expressão escolhida para o cálculo da profundidade de fecho no LTC foi a expressão 2.3 de Hallermeier (1978), para $H_s=2m$ e $T=12s$ (valores apresentados na tabela 2.3). Para a formulação de Pelnard-Considère (1956), a profundidade de fecho baseou-se no valor de Silva (2010). O facto de a profundidade de fecho ser superior,

origina uma evolução mais lenta da largura de praia. Como se verá adiante, mesmo para este valor de profundidade de fecho, a formulação analítica origina uma largura emersa superior à obtida pelo modelo numérico.

$$h_c = 2.28H_s - 68.5 \left(\frac{H_s^2}{gT^2} \right) \quad (2.3)$$

Tabela 2.2 - Geometria adotada para a área de estudo

Parâmetro	Modelo			Protótipo		Escala	
	Lab.	P-C	LTC	P-C	LTC	N_{P-C}	N_{LTC}
$\Delta y'$ (m)	-	-	67	-	5000	-	74.63
$\Delta x'$ (m)	-	135	270	-	20000	-	74.07
$\Delta z'$ (m)	-	-	3.75	-	131.76	-	35.14
m'	0.1	-	0.1	-	0.05	-	0.50
h_c (m)	0.24	0.24	0.12	8.7	4.37	36.25	34.42
$\Delta z'_{emersa}$ (m)	0.16	0.16	2.7	5.8	100	36.25	37.04

Tabela 2.3 - Caracterização da agitação adotada no caso de estudo

Parâmetro	Modelo			Protótipo		Escala	
	Lab.	P-C	LTC	P-C	LTC	N_{P-C}	N_{LTC}
T (s)	2	1.97	1.97	12	9.34	6.09	4.74
L_o (m)	6.06*	6.06	6.06*	224.83	224.83*	37.10	37.10
H_s (m)	0.0540	0.0539	0.0539	2	2	37.11	37.11
α_0 (°)	10	10	10	10	10	1.00	1.00
H_b (m)	0.0745*	0.0745	0.0745*	2.76	2.76*	37.09	37.09
L_b (m)	1.6*	1.6	1.6*	59.46	59.46*	37.16	37.16
α_b (°)	2.645*	2.645	2.645*	2.646	2.646*	1.00	1.00

*Valores calculados pelas mesmas expressões utilizadas para a formulação de Pelnard-Considère (1956)

Tabela 2.4 - Dimensões do esporão adotadas no caso de estudo

Parâmetro	Modelo			Protótipo		Escala	
	Lab.	P-C	LTC	P-C	LTC	N_{P-C}	N_{LTC}
Nível do coroamento (m)	0.12	-	1	-	10	-	10.00
Comprimento (m)	3.4	3.36	3.4	145	140	43.15	41.18
Largura do coroamento (m)	0.06	-	-	-	-	-	-
Declive do talude	0.67	-	-	-	-	-	-
Número de camadas	2	-	-	-	-	-	-

Durante os ensaios realizados em modelo físico, procedeu-se à alimentação da deriva litoral com sedimentos colocados na praia, a barlar do esporão. O volume de sedimentos introduzidos foi selecionado com base em Silva (2010), onde se definia um caudal sólido de cerca de 40kg por hora, calculados através da fórmula de CERC (1984). Mantendo esta dinâmica foi colocado no sistema em estudo, um saco de 25kg de areia a cada 37.5min.

Como se verifica na tabela 2.2, os valores adotados para a relação de escalas horizontal e vertical geométricas, foram os mesmos de Silva (2010): $N_{xy}=74$ e $N_z=37$. Observa-se que a escala horizontal corresponde à relação aproximada das dimensões horizontais da extensão de praia entre o modelo e o protótipo, e a escala vertical corresponde à relação entre as dimensões de altura de onda entre o modelo e o protótipo.

Na perspectiva de avaliar o comportamento de perfis transversais ao longo da praia, foram definidas várias secções de estudo (figura 2.5) cujos valores da distância de cada perfil ao esporão são apresentados na tabela 2.5.

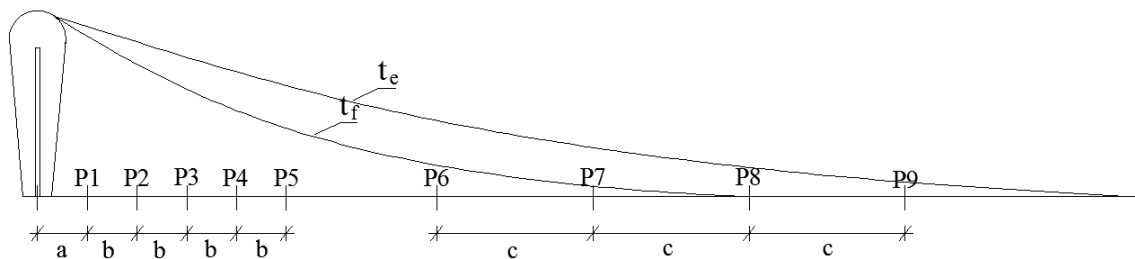


Figura 2.4 - Localização esquemática dos perfis transversais analisados

A localização dos perfis P1 ao P5, no modelo, foi definida com base nas limitações laboratoriais (dimensões do tanque e equipamento necessário), tendo sido feita a aplicação da escala horizontal adotada para a definição da localização dos perfis no protótipo. A definição dos perfis transversais P6 a P9, no protótipo, foi baseada nos resultados da formulação analítica de Pelnard-Considère (1956), tendo sido feita a aplicação da escala horizontal, para a definição dos mesmos perfis em modelo.

Avaliando a formulação de Pelnard-Considère (1956) no instante em que o tempo de enchimento do esporão é atingido, observa-se que todos os pontos da linha de costa ao longo do litoral sofreram variação na sua posição (quanto mais afastados, mais reduzido é o aumento da largura de praia). Assim, para tentar definir a distância de influência do esporão no instante correspondente ao tempo de enchimento, considerou-se o local onde ocorre uma variação da posição da linha de costa correspondente a 5% do comprimento do

esporão. Definindo esse perfil como de interesse para análise (perfil P8), foram escolhidos mais 2 perfis entre este e o esporão (P6 e P7), igualmente espaçados, e um outro mais afastado, mantendo o mesmo espaçamento (P9).

Tabela 2.5 - Valores adotados para a distância (x) entre os perfis selecionados e o esporão

x (m)						
Pelnard-Considère			LTC		Laboratório	
Perfil	Modelo	Protótipo	Modelo	Protótipo	Modelo	Protótipo
P1	0.67	49.58	0.675	50	0.67	49.58
P2	1.67	123.58	1.6875	125	1.67	123.58
P3	2.67	197.58	2.7	200	2.67	197.58
P4	3.67	271.58	3.7125	275	3.67	271.58
P5	4.67	345.58	4.725	350	4.67	345.58
P6	29.48	2181.48	29.3625	2200	-	-
P7	58.96	4362.95	59.0625	4375	-	-
P8	88.44	6544.43	88.425	6550	-	-
P9	117.92	8725.90	117.7875	8725	-	-

Capítulo 3

FORMULAÇÃO ANALÍTICA DE PELNARD-CONSIDÈRE

3. Formulação analítica de Pelnard-Considère (1956)

Pelnard-Considère (1956) formulou um modelo analítico matemático que permite o cálculo da resposta da praia à ação das ondas, através da descrição do movimento da linha de costa. Este tipo de modelos são genericamente designados por modelos de uma linha. Nesta formulação, a partir de uma abscissa, definindo as características sedimentares, as características da ondulação e o intervalo de tempo ao fim do qual se pretende analisar a posição da linha de costa, obtém-se uma ordenada, que indica a posição da linha de costa. O modelo prevê ainda a existência de barreiras físicas perpendiculares à costa, como quebra-mares e esporões, mostrando a variação da geometria da linha de costa em planta, a barlar e sotamar das estruturas (figura 3.1).

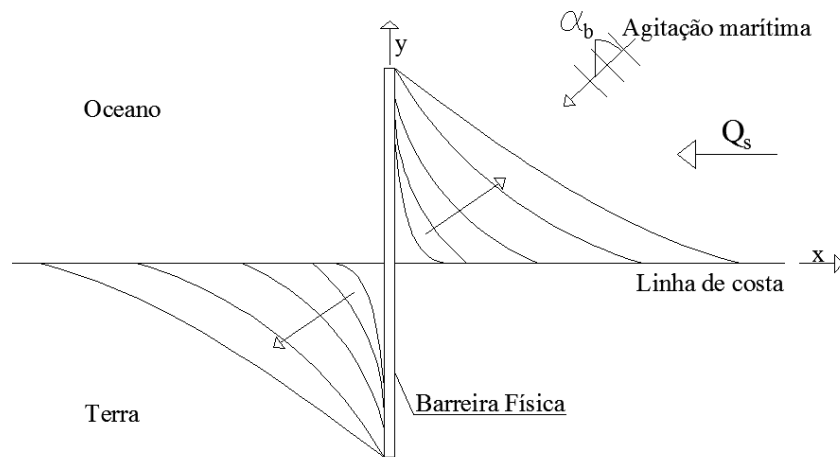


Figura 3.1 - Exemplo da evolução da linha de costa, no tempo, baseado no modelo de Pelnard-Considère (1956), juntamente com o referencial a aplicar

3.1. Parâmetros considerados

Pelnard-Considère (1956) fornece duas expressões (3.1 e 3.2) para o cálculo da posição da linha de costa a barlar de uma estrutura transversal à costa, já que assume que a presença da estrutura origina uma interrupção total do caudal sólido longitudinal até ao instante em que a linha de costa atinge o ponto mais afastado, junto à cabeça da estrutura. A construção desta estrutura é assumida como instantânea. O intervalo de tempo necessário até a linha de costa atingir a referida posição é designado por tempo de enchimento (t_f), determinado pela expressão 3.3. O tempo de enchimento define o intervalo de tempo até ao qual é válida a expressão 3.1. Após a capacidade de enchimento da

estrutura ser atingida, passa-se a utilizar a expressão 3.2 no cálculo da posição da linha de costa, que utiliza um novo tempo de cálculo (expressão 3.4).

Ambas as expressões definem a evolução da linha de costa a barlamar da estrutura. Não existindo uma expressão para a zona a sotamar (onde se observariam os efeitos da difração), é assumido que a linha de costa possui, a sotamar, uma posição de linha de costa antissimétrica, comparada com a configuração a barlamar (figura 3.1).

$$y(x,t)=2\sqrt{\varepsilon} t \tan(\alpha_b) \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{\left[-\left(\frac{x}{2\sqrt{\varepsilon} t}\right)^2\right]} - \frac{x}{2\sqrt{\varepsilon} t} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\varepsilon} t}\right) \right) \text{ para } t < t_f \quad (3.1)$$

$$y(x,t)=Y \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\varepsilon} t_2}\right) \text{ para } t > t_f \quad (3.2)$$

$$t_f = \frac{Y^2 \pi}{4 \varepsilon \tan^2(\alpha_b)} \quad (3.3)$$

$$t_2 = t - 0.383 t_f \quad (3.4)$$

A definição da linha de costa, através da formulação analítica, depende de propriedades como: o comprimento da estrutura transversal (Y); o ângulo da onda na rebentação com a ortogonal à linha de costa (α_b); o instante de cálculo (t); e o parâmetro de calibração (ε). Por sua vez, o parâmetro de calibração (ε), calculado a partir da expressão 3.5, que tem a intenção de contabilizar as propriedades dos sedimentos, da agitação marítima e dos perfis transversais (sendo também utilizado para o cálculo do tempo de enchimento, como se observa na expressão 3.3), engloba outros parâmetros. Para o seu cálculo é necessário definir: a altura de onda na rebentação (H_b); a celeridade da ondulação na rebentação (C_{bg}), de acordo com a expressão 3.6; a porosidade (n) e a massa volúmica dos sedimentos (ρ_s); a altura da berma na zona emersa (B); a massa volúmica do fluído (ρ); e a profundidade de fecho (h_c) associada a um determinado perfil ativo. A profundidade de rebentação (d_b) foi calculada a partir da expressão 3.7.

Para a definição da altura da onda na rebentação, os processos de transformação e alteração das propriedades da ondulação, como a refração, reflexão, difração e empolamento devem

ser tidos em conta. Admitiu-se que a barlamar da estrutura os fenómenos de difração não têm importância, tendo-se desprezado os efeitos da reflexão. Os únicos fenómenos tidos em conta foram a refração, por aplicação da lei de Snell e o empolamento. Estes efeitos dependem da batimetria do fundo, que foi considerada paralela e regular.

$$\varepsilon = \frac{k H_b^2 C_{gb}}{8} \left(\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right) \left(\frac{1}{1-n} \right) \left(\frac{1}{B+h_c} \right) \quad (3.5)$$

$$C_{gb} = \left(g \frac{H_b}{k_b} \right)^{0.5} \quad (3.6)$$

$$d_b = \frac{H_b}{0.78} \quad (3.7)$$

3.2. Análises de sensibilidade

Antes de se proceder à análise do caso de estudo, pretendeu-se avaliar o comportamento da formulação analítica em função de alguns parâmetros, mantendo-se constantes as propriedades geométricas do caso de estudo.

3.2.1. Tempo de análise e incidência da agitação

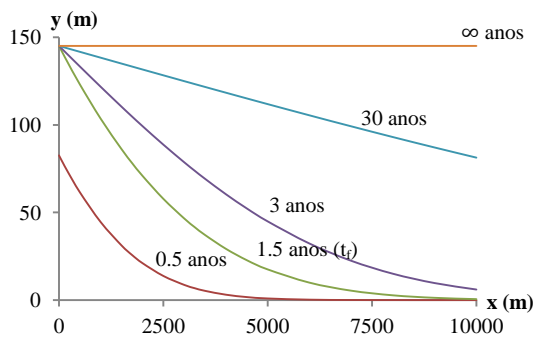
Considerou-se uma estrutura transversal à linha de costa, com 145m de comprimento, uma profundidade de fecho máxima de 8.7m, um perfil de praia com uma altura emersa de 5.8m e um valor de coeficiente de transporte sedimentar de 0.39 (definido em Silva, 2010). A dimensão mediana dos sedimentos seleccionados (d_{50}) foi de 0.5mm, com uma porosidade (n) de 0.4, uma massa volúmica dos sedimentos (ρ_s) de 2650kg/m³, uma massa volúmica da água (ρ) de 1000kg/m³. Foi adotada uma altura de onda significativa de 2m, com um período de pico de 12s, possuindo um ângulo de 10° relativamente à orientação da batimetria, a que corresponde um coeficiente de refração (k_r) de 0.993 e um coeficiente de empolamento (k_s) de 1.391. Destes coeficientes resulta uma altura da onda na rebentação de 2.76m e uma orientação com a batimetria de 2.65°.

De acordo com a figura 3.2a, verifica-se que com o passar do tempo a linha de costa afasta-se da sua posição inicial tendendo a deslocar-se para uma posição paralela, alinhada

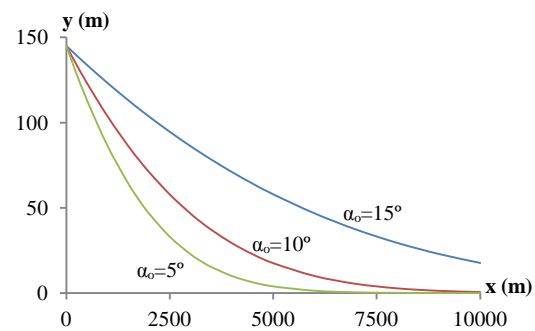
com a cabeça da estrutura, para um instante de tempo infinito. Mantendo as restantes propriedades, quando se analisa o comportamento de três ângulos de incidência da ondulação diferentes (tabela 3.1), registam-se menores tempos de enchimento quando a onda se aproxima da linha de costa com maior obliquidade (maior capacidade de transporte). Consequentemente, no instante em que é alcançado o tempo de enchimento (t_f), a linha de costa toma posições diferentes consoante o ângulo de incidência da onda (figura 3.2b).

Tabela 3.1 - Tempos de enchimento do esporão (t_f) para diferentes ângulos de agitação ao largo (α_o) e consequentes ângulos de rebentação (α_b)

α_o (°)	α_b (°)	t_f (anos)
5	1.32	6.16
10	2.65	1.54
15	3.97	0.68



a) Ao longo do tempo ($\alpha_o=10^\circ$)



b) Para diferentes ângulos de incidência ao largo da ondulação ($t=t_f$)

Figura 3.2 - Posição da linha de costa, por aplicação da formulação de Pernard-Considère (1956) a um esporão com 145m de comprimento

3.2.2. Coeficiente de transporte (k)

O parâmetro adimensional de calibração depende do valor do coeficiente de transporte, k . São várias as formulações que permitem a estimativa deste coeficiente, não existindo um consenso para a sua determinação. É importante realçar também a elevada variabilidade espacial e temporal dos vários parâmetros a serem analisados na estimativa de k_s , como as

dimensões dos sedimentos e as condições de agitação marítima (Schoones e Theron, 1993, 1994; Wang *et al.*, 1998 e Wang e Kraus, 1999).

Komar e Inman (1970) avaliaram o coeficiente de transporte de forma empírica em 0.39, analisando 41 pontos em várias praias. No entanto, de acordo com Miller (1998), o valor de 0.39 não permite prever com precisão o transporte sedimentar longitudinal em alturas de temporal, podendo o seu valor ser superior e inferior. Smith *et al.* (2003) afirmam que os valores de k deverão ser calibrados com dados de campo (utilizando o transporte sólido longitudinal dependente do tipo de rebentação) para uma determinada situação de análise. Wang e Kraus (1999) também afirmam que o valor de k não deverá ser uma constante, mas que este poderá variar de acordo com o tipo de rebentação, como discutido noutros estudos (Kamphuis e Readshaw, 1978, Vitale, 1981, Ozhan, 1982, Bodge e Dean, 1987, e Bodge e Kraus, 1991). Como tal, o valor de k dependerá do número de Irribarren (expressão 3.8), que permite identificar o tipo de rebentação (progressiva, mergulhante e oscilante).

$$\xi_0 = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\delta_0}} = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_0/L_0}} \quad (3.8)$$

Nos ensaios realizados por Wang e Kraus (1999) obteve-se um intervalo de valores para k entre 0.04 e 0.54, com um valor médio de 0.2. Schoones e Theron (1993) obtiveram, para uma amostra de 46 pontos, um valor de k de 0.41, para um diâmetro mediano inferior a 1mm.

Formulação de Bailard (1981)

A expressão 3.9 foi proposta por Bailard (1981) e apresenta k em função do ângulo de rebentação das ondas e da relação entre a magnitude da velocidade orbital (u_{mb}) dada pela expressão 3.10, e a velocidade de queda dos sedimentos (ω_s). Esta abordagem é fisicamente mais realista, introduzindo o conceito de fluxo de energia e assumindo que parte do fluxo de energia criado pelas correntes longitudinais é consumido para transportar sedimentos por arrastamento e suspensão.

$$k=0.05+2.6\sin^2(2\alpha_b)+0.007\frac{u_{mb}}{\omega_s} \quad (3.9)$$

$$u_{mb}=\frac{k}{2}\sqrt{g d_b} \quad (3.10)$$

Formulação de Valle *et al.* (1993)

Valle *et al.* (1993) propuseram uma expressão que relaciona o valor de k com o diâmetro mediano (d_{50}) dos sedimentos (expressão 3.11).

$$k=1.4e^{-2.5d_{50}} \quad (3.11)$$

O comportamento da expressão de Valle *et al.* (1993) revela que com o aumento da dimensão dos sedimentos, k tende para zero. Quanto menor o valor de k , menor será a capacidade de transporte sedimentar, menor será ε e consequentemente, maior será o tempo de enchimento de um esporão.

Procedeu-se a uma breve análise da sensibilidade da estimativa de k pela expressão de Bailard (1981) em função das características das ondas e das areias. Começou-se por definir um valor de d_{50} constante, fazendo-se variar as características da agitação marítima (tabela 3.2). A velocidade de queda foi estimada de acordo com a formulação de Van Rijn (1984) representada na expressão 3.12, tendo em consideração o parâmetro adimensional de dimensão dos sedimentos, D_* , de acordo com a expressão 3.13.

$$\omega_s=\frac{v D_*^{2.1}}{6d_{50}} \quad \text{para } 39 \leq D_*^3 \leq 10^4 \quad (3.12)$$

$$D_*=d_{50}\left(\frac{(s-1)g}{v^2}\right)^{1/3} \quad (3.13)$$

Na análise feita à escala do protótipo, observa-se na figura 3.3 que quanto maior for o ângulo da ondulação ao largo maior será o valor de k . Os maiores valores do coeficiente de transporte sedimentar registam-se para uma altura de onda de 2.5m e período de onda de

pico de 10s e os menores para uma altura de onda de 1.5m e um período de onda de pico de 14s. Para as 3 alturas de onda consideradas, a diminuição do período (aumento da frequência) origina um aumento dos valores de k . Assumindo um período de onda constante, quanto maior for a altura de onda maior será o k . A diminuição do período de onda e o aumento de altura de onda estão associados a climas de agitação marítima mais energéticos possuindo por isso uma maior capacidade de transporte sedimentar, traduzido pelo comportamento de k .

Tabela 3.2 - Condições de agitação na rebentação, para um rumo da agitação de 10° e diferentes alturas de onda ao largo

H_s (m)	T (s)	H_b (m)	α_b ($^\circ$)	k_r	k_s
2	12	2.76	2.646	0.9929	1.3915
1.5	12	2.22	2.298	0.9928	1.4885
2.5	12	3.28	2.950	0.9930	1.3219
2	10	2.54	3.158	0.9931	1.2804
1.5	10	2.04	2.747	0.9929	1.3669
2.5	10	3.03	3.516	0.9933	1.2188
2	14	2.97	2.275	0.9928	1.4958
1.5	14	2.39	1.974	0.9927	1.6020
2.5	14	3.52	2.538	0.9929	1.4193

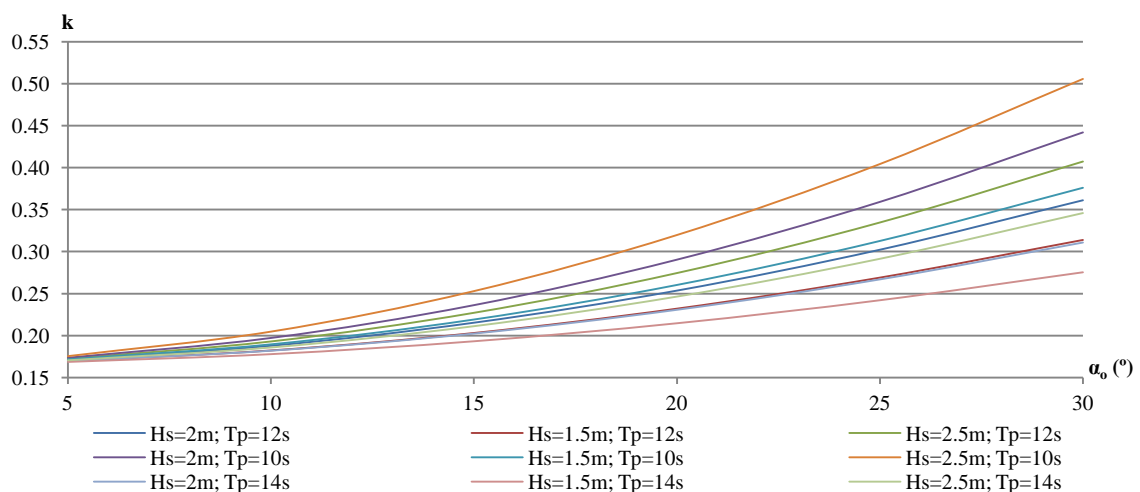


Figura 3.3 - Variação do valor de k segundo a expressão de Bailard (1981), em função da orientação da agitação ao largo, para um $d_{50}=0.5\text{mm}$

A variação da dimensão dos sedimentos reflete-se na variação da velocidade de queda das partículas. Considerando d_{50} de 0.3, 0.5 e 1.0mm, para uma altura de onda de 2m com um período de 12s, concluiu-se que quanto maior for o diâmetro das partículas, menores serão os valores de k , para um mesmo ângulo da onda na rebentação. A curva que descreve o comportamento de k em função do ângulo de rebentação da ondulação apresenta uma configuração semelhante para as várias dimensões dos sedimentos observando-se apenas uma translação vertical ascendente entre as curvas à medida que o valor de d_{50} diminui (figura 3.4). Para a análise da influência do d_{50} foram utilizadas as propriedades indicadas nas tabelas 2.1 à 2.4.

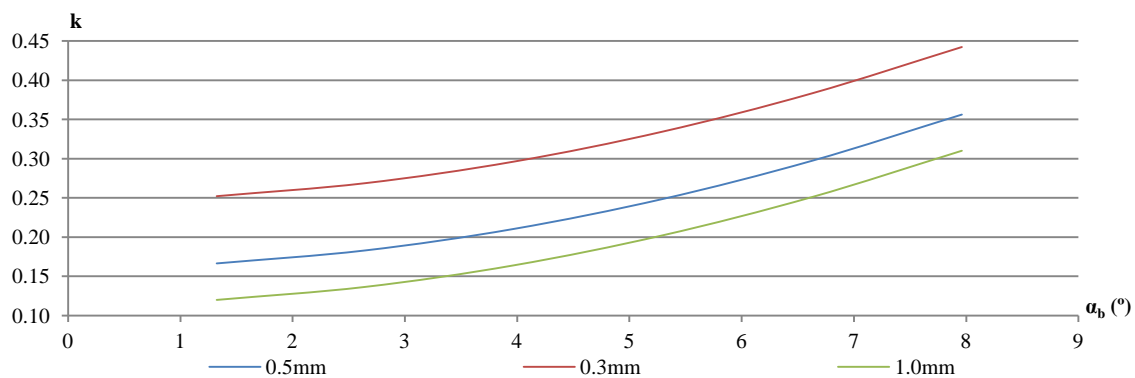


Figura 3.4 - Variação do valor de k , em função de α_b , para diferentes valores de d_{50} , segundo Bailard (1981)

Na figura 3.5 é representado o comportamento de k em função de d_{50} para as diferentes formulações analisadas. Nesta avaliação foi admitida uma altura de onda de 2m e período de 12s, com orientação da onda de 10° . Nesta figura apresentam-se também os valores de k igual a 0.39 e a 0.2. O primeiro valor foi selecionado por ser o mais comumente utilizado e o segundo por representar a média de uma gama de valores, obtida por Wang e Kraus (1999). Realçam-se as situações de d_{50} definidas no caso de estudo. Para o valor de d_{50} de 0.5mm e as condições de agitação marítima de protótipo, os valores de k que resultam da análise são 0.183 (Bailard, 1981) e 0.401 (Valle *et al.*, 1993).

Analizando as condições de agitação marítima e sedimentares definidas para a escala do modelo físico, a única alteração que se observou no valor de k foi no comportamento da curva obtida pela expressão de Bailard (1981), já que é a única expressão que depende das condições de agitação marítima. Assim, analisando um modelo onde a energia associada à ondulação é menor (*e.g.* menor altura de onda), resultam valores de k mais reduzidos e uma diminuição do caudal sólido, como se observa comparando as curvas do modelo e protótipo (figura 3.5). As restantes formulações são independentes das propriedades do

cenário de análise (modelo ou protótipo), pelo que, para o valor de d_{50} de 0.27mm (modelo) e as condições de agitação marítima do modelo, o valor mínimo de k passa a ser 0.108 (Bailard, 1981) e o máximo 0.713 (Valle *et al.*, 1993).

Após a análise da influência de k na aplicação da formulação de Pelnard-Considère (1956) a um esporão, nos cálculos seguintes foi decidido utilizar os valores extremos (máximos e mínimos), para os estudos à escala do protótipo e do modelo físico. Considerando estes valores de k , os resultados correspondentes de ε e de t_f (tempo de enchimento) são distintos, sendo apresentados na tabela 3.3. Naturalmente quanto maior o valor de k , menor o tempo de enchimento.

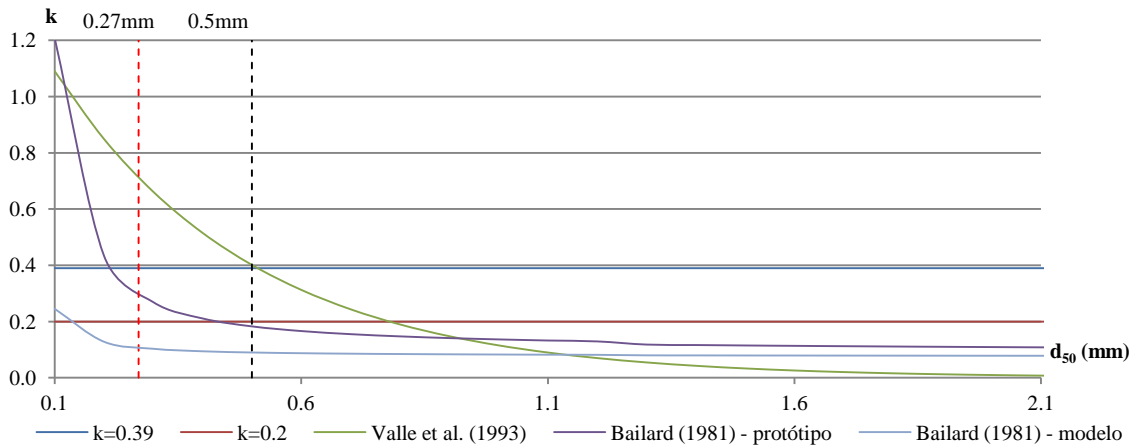


Figura 3.5 - Coeficiente de transporte, k , em função do d_{50}

Tabela 3.3 - Tempo de enchimento, em função dos coeficientes de transporte adotados (formulação de Pelnard-Considère, 1956)

	k	ε	t_f (anos)
Modelo	0.108	0.0002	0.693
	0.713	0.0012	0.105
Protótipo	0.183	0.0767	3.28
	0.401	0.1639	1.50

A forma de evolução da configuração da linha de costa ao longo do tempo que resulta da aplicação da formulação de Pelnard-Considère (1956) a barlamar de um esporão é independente do coeficiente de transporte. Observa-se que as diferenças registadas só afetam a rapidez com que a linha de costa atinge uma determinada posição, alterando

consequentemente o tempo de enchimento do esporão (figura 3.6). Considerando o tempo de enchimento correspondente, as linhas de costa obtidas em cada k sobrepõem-se, tanto no protótipo como no modelo. Nestes casos, observa-se um aumento da largura de praia superior ou igual a 5% do comprimento do esporão numa extensão de cerca de 6544m e 152m para o protótipo e o modelo, respetivamente.

No protótipo (figura 3.6a), para o menor valor de k e o menor tempo de enchimento, a linha de costa também não alcança a cabeça do esporão, registando-se uma largura máxima de 97.89m (67.51% do comprimento do esporão) imediatamente a barlar. Registou-se um aumento da largura de praia superior ou igual a 5% do comprimento do esporão numa extensão de 3500m a barlar. Para o modelo (figura 3.6b), no caso do menor valor de k e de um tempo inferior ao de enchimento, a linha de costa não atinge a cabeça do esporão, alcançando uma posição correspondente a 38.53% do comprimento do esporão imediatamente a barlar. Registou-se um aumento da largura de praia superior ou igual a 5% do comprimento do esporão numa extensão de 30m a barlar.

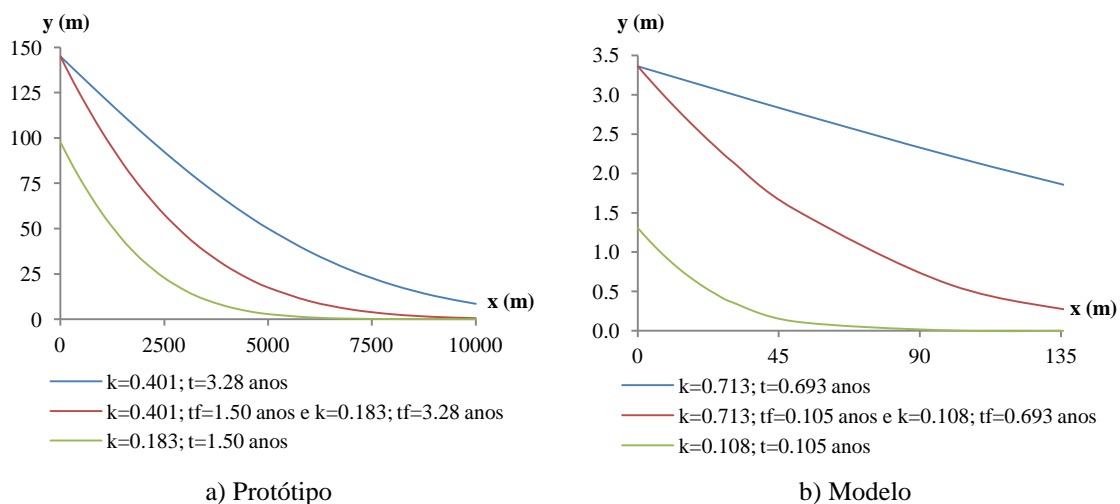


Figura 3.6 - Posição da linha de costa a barlar de um esporão, segundo Pelnard-Considère (1956)

3.3. Evolução da linha de costa

Tendo em consideração as escalas do protótipo e do modelo, na figura 3.7, avalia-se a evolução da largura da praia ao longo do tempo, para as diferentes distâncias ao esporão, considerando um intervalo de tempo de análise igual a 10 anos para o protótipo e 2 anos para o modelo, ou seja, aproximadamente três vezes o maior valor do tempo de enchimento. Observa-se um crescimento mais rápido da largura nos perfis mais próximos

do esporão (P1 a P5), enquanto não é atingido o tempo de enchimento, evoluindo de forma mais lenta após esse instante. A largura dos perfis P6 a P9 evolui mais lentamente, devido à maior distância ao esporão. Quanto menor for o k mais lentamente evolui a largura emersa de todos os perfis.

Os 5 perfis mais próximos do esporão possuem ligeiras diferenças entre os valores da largura emersa ao longo do tempo para um determinado valor de k , registando-se maiores diferenças para os restantes perfis. Este registo de maiores diferenças deve-se ao facto da distância entre os perfis P6 a P9 ser superior à dos perfis P1 a P5. Em todos os perfis identifica-se visualmente a diferença no comportamento da evolução da largura emersa a partir do tempo de enchimento. Para um instante de tempo infinito, todos os perfis tenderão para um valor de largura emersa igual ao comprimento do esporão.

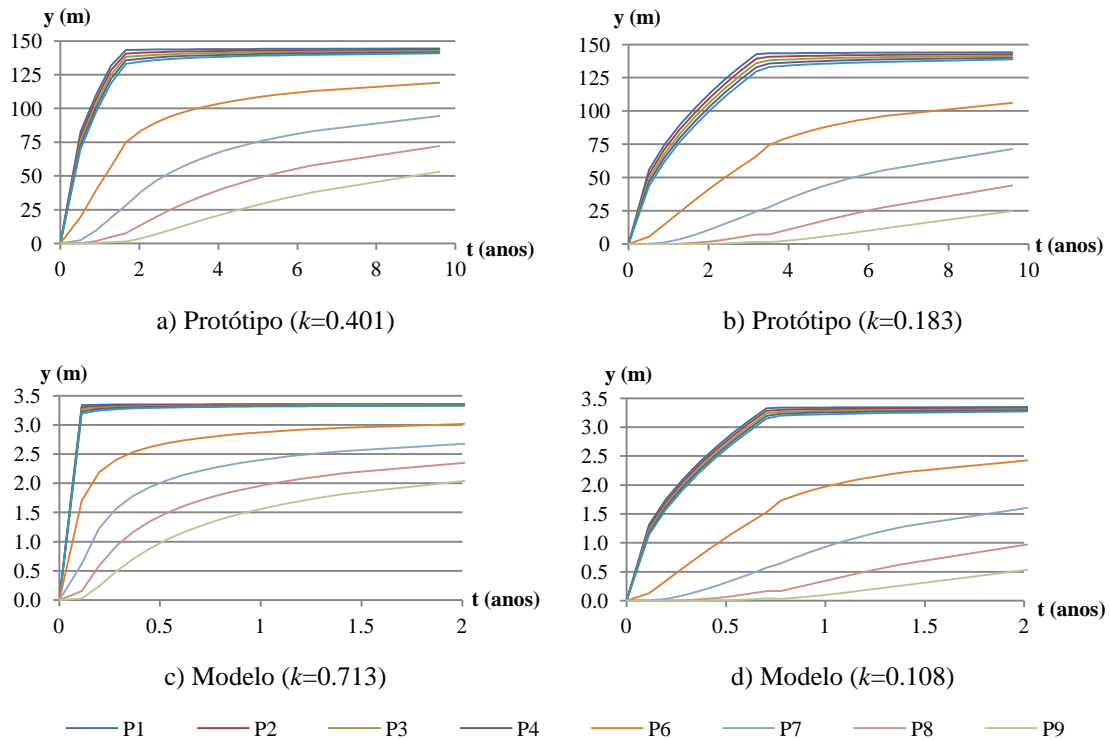


Figura 3.7 - Evolução da largura da praia nos perfis transversais P1 a P9 segundo Pelnard-Considère (1956)

Na tabela 3.4 encontram-se os valores das diferenças máximas da largura emersa entre perfis consecutivos. As diferenças entre perfis consecutivos para os perfis P1 a P5 ocorrem no mesmo instante e são iguais em todos para cada valor de k no modelo e no protótipo. Com a diminuição do valor de k , as diferenças máximas registam-se mais tardiamente, mas mantendo aproximadamente o seu valor, independentemente do valor k . Para os perfis mais afastados, à medida que os perfis se afastam as diferenças máximas diminuem e aumenta o

intervalo de tempo necessário para que sejam alcançadas. No modelo verifica-se a particularidade de que, as diferenças máximas entre os perfis P6 e P7, e P7 e P8 se registam no mesmo instante de tempo.

Comparando a evolução da linha de costa, para o protótipo, em função de diferentes capacidades de transporte, observa-se uma maior diferença da largura da praia (Δy) na zona mais próxima do esporão até um instante próximo do menor tempo de enchimento ($k=0.401$ e $t_f=1.50$ anos), sendo o valor máximo das diferenças de 43.77m (cerca de 29.90% do comprimento do esporão), registado para o perfil P5. A partir deste instante as diferenças, para os perfis P1 a P5, diminuem abruptamente.

Tabela 3.4 - Diferenças máximas entre perfis e instantes onde são observadas

		Perfis	P1-P2	P2-P3	P3-P4	P4-P5	P6-P7	P7-P8	P8-P9
Protótipo	$k=0.401$	Diferenças (m)	3.35	3.30	3.24	3.19	46.68	28.07	20.04
		Instante (anos)	1.28	1.28	1.28	1.28	1.66	3.52	6.08
	$k=0.183$	Diferenças (m)	3.36	3.31	3.26	3.21	46.71	27.90	19.35
		Instante (anos)	3.20	3.20	3.20	3.20	3.52	6.40	9.59
Modelo	$k=0.713$	Diferenças (m)	0.05	0.05	0.04	0.04	0.88	0.66	0.47
		Instante (anos)	0.029	0.029	0.029	0.029	0.115	0.115	0.202
	$k=0.108$	Diferenças (m)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.87	0.66	0.47
		Instante (anos)	0.721	0.721	0.721	0.721	0.793	0.793	1.153

Para os perfis P6 a P9, apenas o perfil P6 regista uma diferença máxima próxima da referida anteriormente (figura 3.8a). Todas as diferenças entre as larguras emersas tenderão a ser nulas para um instante de tempo infinito, pois a posição da linha de costa final tende a tomar uma posição paralela à linha de costa inicial. Quanto mais próximo se estiver da estrutura mais rapidamente essa diferença tende para zero. Observa-se também que quanto mais afastado o perfil estiver do esporão, mais tardiamente se registam as diferenças máximas entre diferentes capacidades de transporte.

O comportamento do modelo é análogo ao do protótipo (figura 3.8b), também para o modelo se observa uma maior diferença nos perfis mais próximos do esporão, até a um instante próximo do tempo de enchimento que resulta do maior valor de k ($k=0.713$ e $t_f=0.105$ anos), obtendo-se um valor máximo de 2.06m (60.59% do comprimento do esporão) registado para o perfil P5. A partir deste instante as diferenças para os perfis P1 a P5 diminuem. Para os perfis P6 a P9 observa-se um atraso no alcance da diferença

máxima, comparando com os perfis P1 a P5. Após o alcance da diferença máxima, as diferenças diminuem, tendendo para zero à medida que o tempo tende para um instante infinito.

Conclui-se que para o modelo a diferença entre a largura emersa de perfis, para os valores extremos possíveis de k , originam maiores diferenças relativas do que no protótipo (associada à maior diferença entre os coeficientes de transporte considerados). Para a janela temporal analisada (aproximadamente três vezes o tempo de enchimento máximo de cada cenário, modelo e protótipo), as diferenças entre os perfis P6 a P9 tendem mais rapidamente para zero e o valor máximo é atingido mais rapidamente na situação à escala do modelo.

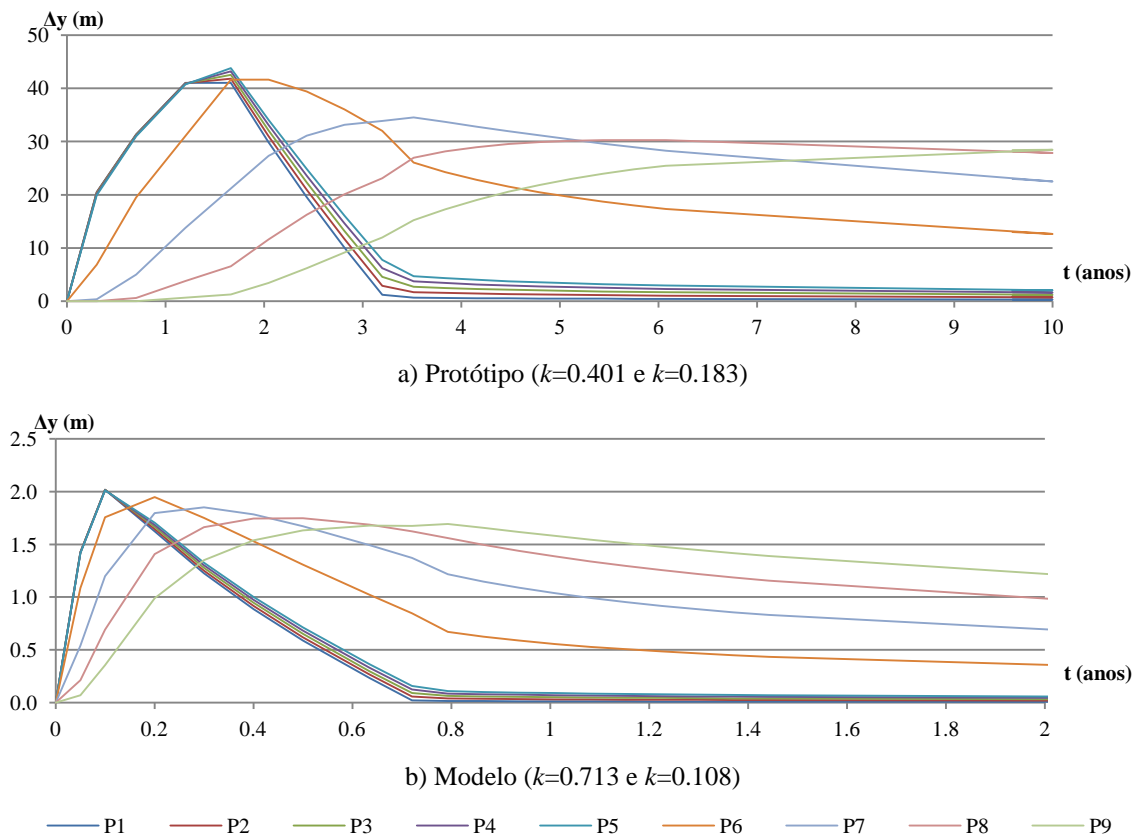


Figura 3.8 - Variação das diferenças entre larguras emersas dos perfis transversais P1 a P9, entre dois valores do coeficiente de transporte sedimentar

3.4. Comparação entre protótipo e modelo

As figuras 3.9 e 3.10 referem-se a uma análise feita na tentativa de encontrar um comportamento semelhante entre a evolução da largura emersa dos perfis transversais à escala do protótipo e o modelo físico, permitindo identificar semelhanças geométricas na

configuração final da linha de costa. No eixo vertical dos gráficos das figuras 3.9 e 3.10, encontra-se representado o quociente entre a largura emersa de cada perfil e o comprimento do esporão, enquanto no eixo horizontal encontram-se os instantes de análise relativos ao tempo de enchimento máximo (obtido a partir do k mínimo).

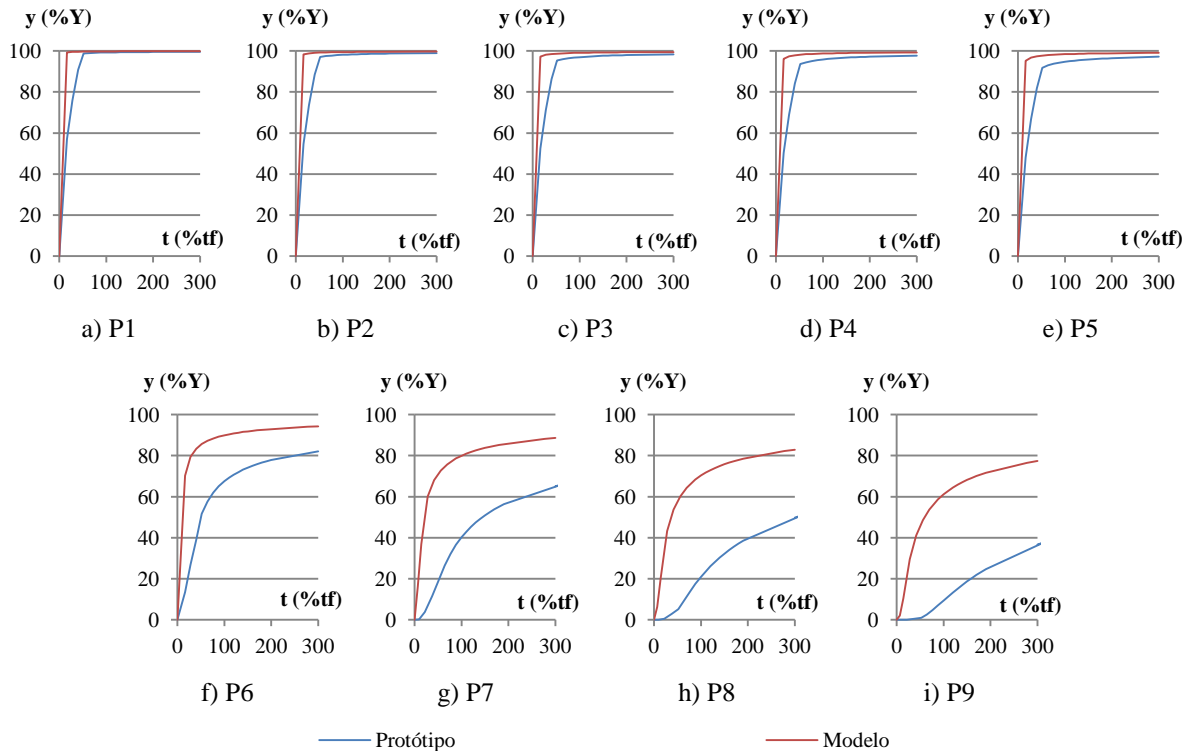


Figura 3.9 - Evolução da largura emersa relativa dos perfis, à escala do protótipo e do modelo, para o valor máximo do coeficiente de transporte, ao longo do tempo, segundo a formulação de Pelnard-Considère (1956)

Olhando aos 5 perfis mais próximos do esporão, observa-se uma semelhança em termos de comportamento da evolução da largura emersa, com um rápido aumento, até um valor próximo do comprimento do esporão, seguida de uma estabilização da sua evolução (figuras 3.9a à 3.9d e figuras 3.10a à 3.10d). As diferenças tendem a aumentar à medida que os perfis se afastam do esporão. Observa-se uma evolução mais lenta da largura emersa, relativa ao comprimento de cada esporão, para o protótipo, observável em todos os perfis. Para o valor mais reduzido de k a evolução da largura emersa do protótipo aproxima-se mais da do modelo. As menores diferenças entre protótipo e modelo registam-se para os valores mínimos de k , pois estes são mais próximos (0.183 e 0.108) do que os valores máximos (0.401 e 0.713). Para um instante temporal de análise infinito as diferenças entre as larguras emersas tenderão para um valor nulo, pois todos os perfis tendem para o mesmo valor de largura emersa, independentemente do valor de k .

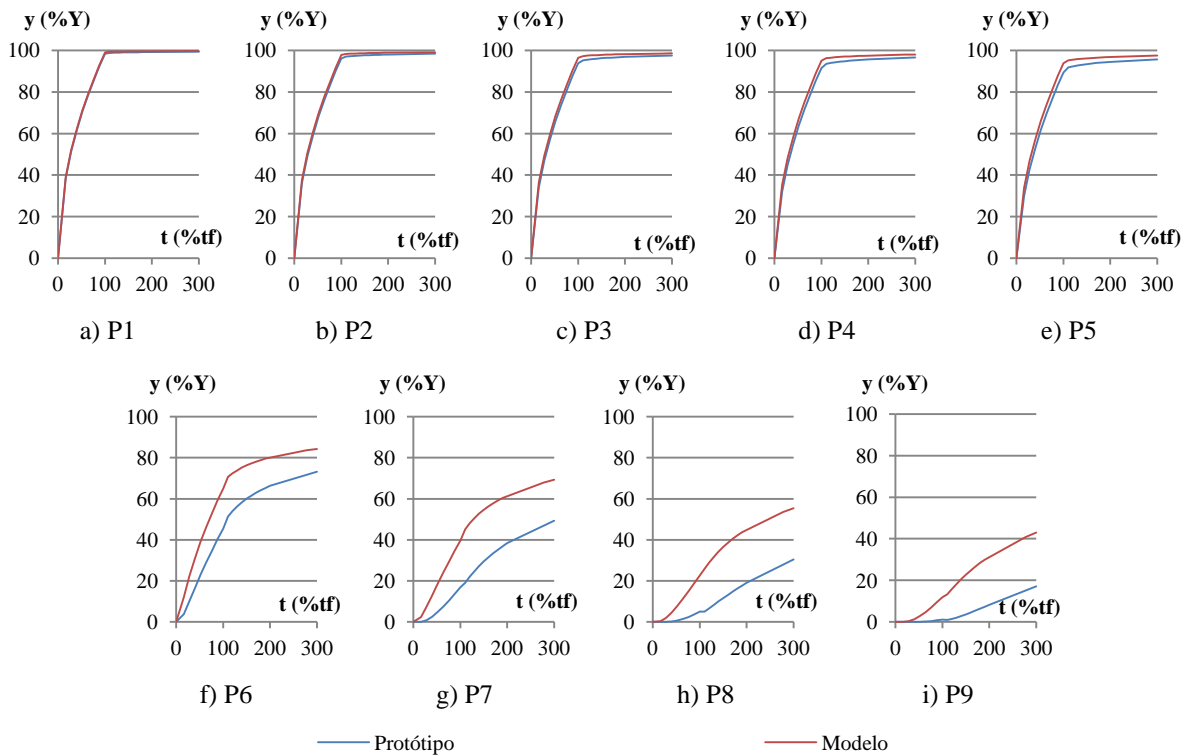


Figura 3.10 - Evolução da largura emersa relativa dos perfis, à escala do protótipo e do modelo, para o valor mínimo do coeficiente de transporte, ao longo do tempo, segundo a formulação de Pelnard-Considère (1956)

Para o valor de k máximo (figura 3.9), observa-se um aumento das diferenças médias relativas de 4.40% a 45.60% e um aumento das diferenças máximas de 42.40% a 51.80%, do perfil P1 ao perfil P9. As diferenças máximas dos perfis P1 a P6 registam-se num instante igual a 16% do maior tempo de enchimento. A partir destes perfis as diferenças máximas entre protótipo e modelo registam-se mais tardiamente: 40% de t_f para o P7; 52% de t_f para o P8; e 100% de t_f para o P9. Para os menores valores de k (figura 3.10) as diferenças registadas são inferiores. Regista-se um aumento das diferenças médias absolutas de 0.50% a 20.40% para os perfis P1 a P7, existindo uma redução deste valor até 13.7% até ao perfil P9. As diferenças máximas absolutas aumentam de 0.70% a 34.40% desde o perfil P1 ao P8, observando uma redução para o perfil P9 até 32.70%. As diferenças máximas registam-se mais tardiamente do que para os valores máximos de k : 100% de t_f para os perfis P1 a P6; e 200% de t_f para os restantes perfis.

Capítulo 4

MODELAÇÃO NUMÉRICA COM O LTC

4. Modelação numérica com o LTC

A modelação numérica assume um papel muito importante no planeamento e dimensionamento de obras de defesa costeira (Taveira-Pinto *et al.*, 2007). Segundo Dias (1997), a multiplicidade de parâmetros físicos envolvidos nos processos modeladores e a sua complexidade, juntamente com o reduzido número de experiências de campo (em função das difíceis condições de monitorização) tornam a modelação uma ferramenta indispensável. Os modelos numéricos devem ser utilizados com precaução e calibrados, sempre que possível, com dados obtidos em ensaios laboratoriais e/ou dados recolhidos no campo.

4.1. Descrição do modelo numérico

O programa LTC (Long-Term Configuration) foi elaborado para tentar prever o comportamento da configuração da linha de costa e da morfologia da zona costeira ao longo do tempo (Coelho *et al.*, 2004, Coelho, 2005, Coelho *et al.*, 2007, Coelho *et al.*, 2009 e Coelho *et al.*, 2013). O LTC está preparado para análise de praias arenosas (sedimentos não coesivos), assumindo que o transporte sedimentar longitudinal é controlado pelas ondas, correntes, ventos, níveis de água, natureza dos sedimentos, juntamente com as condições fronteira (extremos da grelha modelada). No modelo LTC procede-se à variação uniforme das cotas dos pontos situados no perfil ativo, realizando-se um ajuste deste perfil com as zonas adjacentes, pelo que, a variação da posição da linha de costa, além de depender da variação vertical da cota dos pontos do perfil ativo (Δz), depende também da batimetria e topografia associada a cada perfil transversal (Coelho, 2005).

Comparando o LTC com outros modelos de uma linha, como o GENESIS (Hanson e Kraus, 1989, 1991, 2004 e 2011), este possui a vantagem de eliminar o pressuposto de que o perfil transversal se mantém invariável no tempo, permitindo a evolução deste perfil em situação de acumulação persistente de sedimentos, como acontece a barlamar de um esporão (Silva, 2010). Assim, este modelo difere de outros, pois entre a ação de cada onda é calculada uma nova forma do perfil transversal, em vez de se somar a ação de todas as ondas incidentes. Por necessidade de controlo da forma do perfil, são presentemente admitidas limitações que permitem controlar alguns dos parâmetros da sua evolução.

Como tal, existe necessidade de estudar qual a forma dos perfis transversais quando evoluem no tempo em situação de défice ou ganho sedimentar (erosão e acreção respetivamente), a sotamar e barlamar de esporões (Coelho, 2005).

Com o LTC é possível modelar estruturas de defesa costeira e obter a consequente orientação da linha de costa. Efetuando uma análise em pormenor do que se passa na envolvente próxima de um esporão, pode visualizar-se um comportamento semelhante ao referido pela teoria de Pelnard-Considère. À medida que se verifica o enchimento a barlamar do esporão, existe défice sedimentar a sotamar, com o consequente recuo da linha de costa. Ao longo do tempo, o avanço da linha de costa a barlamar do esporão permite que se verifique passagem de sedimentos para sotamar, reduzindo a taxa de erosão e originando uma configuração da linha de costa em equilíbrio.

4.2. Análises de sensibilidade

Foi feita uma análise da sensibilidade do LTC a vários parâmetros nomeadamente à: largura do perfil ativo a sotamar, aos ângulos de atrito dos sedimentos, à batimetria inicial e às fórmulas de cálculo do transporte sedimentar.

Foram criados vários cenários de análise para cada parâmetro. Em todos os cenários analisou-se os resultados para dois valores do parâmetro NB (NB=1 e NB=2). Este parâmetro corresponde a diferentes considerações de ângulos de atrito das areias constituintes do perfil transversal. A diferença entre a utilização do valor 1 ou 2 para o parâmetro NB é o facto de para NB=2 ser necessário introduzir o máximo ângulo de atrito interno do terreno com a horizontal, nos limites submerso e emerso do perfil ativo, em situação de acreção e o máximo ângulo de atrito interno do terreno com a horizontal, nos limites submerso e emerso do perfil ativo, em situação de erosão. Resumidamente, a utilização deste parâmetro permite que os perfis transversais possuam uma geometria onde a inclinação dos limites emerso e submerso do perfil ativo são condicionadas pelo ângulo de atrito das areias, originando o aparecimento de bermas emersas e submersas à semelhança do que acontece na realidade.

Olhando a todos os resultados da extensa e pormenorizada análise de sensibilidade desenvolvidas, resumem-se as principais conclusões:

- A influência do parâmetro NB=2 é muito variável, dependendo bastante do valor das restantes propriedades adotadas nos cenários testados, quer à escala do modelo

quer do protótipo. Como tal, admitiu-se como mais fiável a utilização do parâmetro $NB=1$ para as análises numéricas a desenvolver, tendo sido o parâmetro adotado;

- À escala do protótipo, para os cenários que variaram a largura ativa a sotamar (entre 0 a 50 vezes o comprimento do esporão) e os ângulos de atrito dos sedimentos (entre 15° a 30° para os ângulos de atrito transversais e 5° a 15° para o ângulo de atrito longitudinal) pode-se afirmar que as principais diferenças em planta (30% da diferença máxima registada em cada cenário) ocorrem numa extensão igual a cerca de 10 vezes o comprimento do esporão, registando-se diferenças máximas semelhantes entre todos os cenários (maior diferença registada foi de 12.09% do comprimento do esporão). A alteração da batimetria inicial (no perfil inicial de Dean, 1977, o parâmetro A assumiu os valores de 0.153, 0.170 e 0.184) origina diferenças da largura emersa muito superiores às registadas nos cenários descritos anteriormente (diferença máxima registada de cerca de 44.14% do comprimento do esporão), mas a máxima extensão onde ocorrem as diferenças mais significativas diminui para cerca de 8 vezes o comprimento do esporão. O impacto à escala do modelo é ainda superior, originando instabilidades numéricas nos resultados. Entre todos os parâmetros alterados registam-se diferenças máximas à escala do protótipo até 44.14% do comprimento do esporão, com a presença das diferenças mais significativas até uma extensão de praia de 21.72 vezes o comprimento do esporão;
- A alteração da fórmula de cálculo do transporte sedimentar (CERC, 1984 ou Kamphuis, 1991) origina diferenças superiores da largura emersa às registadas nos cenários onde foi estudado o impacto da variação da largura ativa a sotamar e os ângulos de atrito dos sedimentos, e inferiores às do cenário onde foi estudada a influência da batimetria inicial (vários perfis de Dean, 1977), possuindo um valor máximo de 34.85% do comprimento do esporão, na escala do protótipo. A alteração da expressão do transporte sólido altera a configuração final da linha de costa;
- À escala do modelo, os cenários onde se procedeu à alteração da batimetria inicial foram desprezados devido a problemas de instabilidade numérica;
- Entre os cenários onde se variou a largura ativa no modelo (entre 0 a 30 vezes o comprimento do esporão) e os ângulos de atrito (entre 15° a 30° para os ângulos de

atrito transversais e 5° a 15° para o ângulo de atrito longitudinal) observam-se diferenças máximas de 9.35% do comprimento do esporão. A máxima distância ao esporão até onde se registam as diferenças mais significativas é de cerca de 18.23 vezes o comprimento do esporão;

- A alteração da expressão para o cálculo do transporte longitudinal sedimentar, originou menores diferenças relativas à escala do modelo. No entanto, foi neste cenário onde se identificou a maior diferença entre a posição da linha de costa de 26.70%. As diferenças são maiores na zona mais próxima do esporão, sendo a distância ao esporão, onde se verificam as diferenças mais significativas, cerca de 3.70 vezes o comprimento do esporão;
- À escala do modelo, para a variação da largura ativa e ângulos de atrito dos sedimentos, registaram-se menores diferenças máximas, no entanto, a distância ao esporão onde se identificam as diferenças mais significativas é superior. Observou-se o oposto nos restantes cenários analisados;
- O aumento da largura ativa a sotamar origina uma menor largura de praia a barlar. Este não produz diferenças significativas para uma extensão longitudinal adotada superior a 5 vezes o comprimento do esporão;
- A variação do ângulo de atrito dos sedimentos nem sempre se traduz num aumento da largura de praia;
- Todos os cenários associados à alteração da batimetria inicial registaram os maiores valores de alteração das cotas, com alterações significativas da inclinação do talude dos perfis transversais.

4.3. Simulação à escala do protótipo

Neste ponto é analisada a influência da variação dos parâmetros de entrada para simulação do caso de estudo à escala do protótipo, procedendo-se depois a uma análise da linha de costa e dos perfis transversais para o tempo de enchimento definido por Pelnard-Considère e por fim é analisada uma situação de equilíbrio.

4.3.1. Tempo de enchimento

Como referido, a análise da configuração em planta foi feita para NB=1 visto existirem muitos cenários que não são calculados até ao fim para NB=2. Foi realizada uma análise

para dois valores de k , cujos resultados se encontram representados na figura 4.1. O valor de $k=0.401$ origina um tempo de enchimento de 1.50 anos correspondente a aproximadamente 13107 horas. O valor de $k=0.183$ origina um tempo de enchimento de 3.28 anos correspondente a 28757 horas.

A configuração da linha de costa é geometricamente diferente da definida por Pelnard-Considère (1956). No entanto, à semelhança do que acontece no modelo analítico de Pelnard-Considère (1956), a posição da linha de costa para o instante de enchimento é aproximadamente igual entre valores de k e o seu tempo de enchimento associado, como se constata pela figura 4.1. Existe quase uma sobreposição entre os cenários para $k=0.401$ ($t_f=1.50$ anos) e $k=0.183$ ($t_f=3.28$ anos), tendo-se registado uma diferença média da largura emersa da praia de cerca de 0.26m (0.17% do comprimento do esporão). A largura emersa média da praia para $k=0.401$ e $t_f=1.50$ anos é ligeiramente superior à obtida para $k=0.183$. A maior diferença registada entre os cenários anteriores foi de 1.25m (0.86% do comprimento do esporão) a uma distância de 925m da estrutura transversal.

Olhando para as diferenças representadas na figura 4.2, observa-se um comportamento semelhante na variação das mesmas. As maiores diferenças médias registam-se para o maior valor de k , enquanto a maior diferença registada se observa para o menor valor de k . Esta regista-se mais próxima do esporão para o menor valor de k . No entanto, para o maior valor de k a extensão onde ocorrem as diferenças mais significativas é bastante superior à obtida para o menor valor de k .

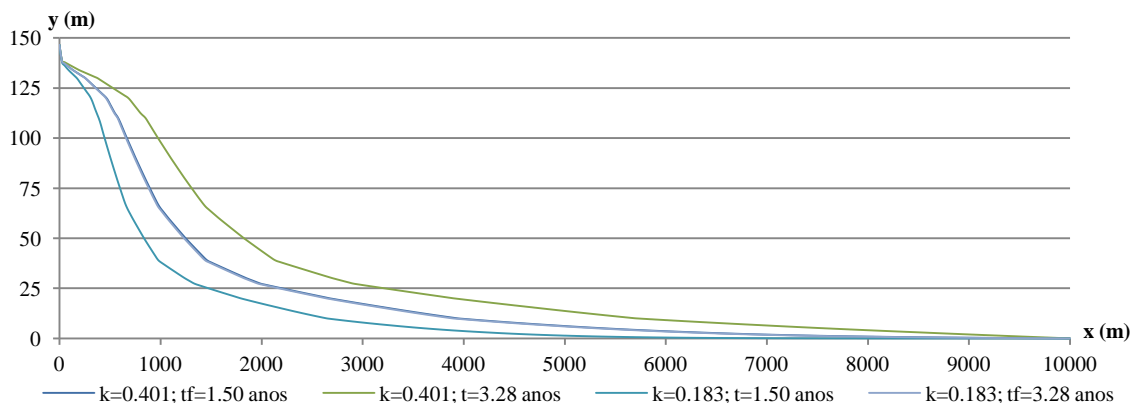


Figura 4.1 - Posição da linha de costa a barlavento de um esporão, obtida pelo LTC, ao fim do tempo de enchimento, à escala do protótipo

Quanto maior for o valor de k mais rapidamente a linha de costa tende para uma posição de equilíbrio. Logo, para um mesmo instante de análise quanto maior for o valor de k , maior

será a largura emersa dos perfis transversais da praia (para uma situação anterior ao equilíbrio).

Para o mesmo valor de k (0.401) entre os dois tempos de enchimento registou-se uma diferença média na largura de praia de 8.64m (5.96% do comprimento do esporão) e um valor máximo de 33.05m (22.83% do comprimento do esporão) a 975m do esporão, sendo a largura emersa superior para o cenário calculado como maior tempo de simulação (figura 4.2). As diferenças mais significativas (diferenças iguais ou superiores a 30% da diferença máxima registada) ocorrem até cerca de 2775m da extensão de praia a barlar do esporão, correspondendo a uma distância de 19.14 vezes o comprimento do esporão.

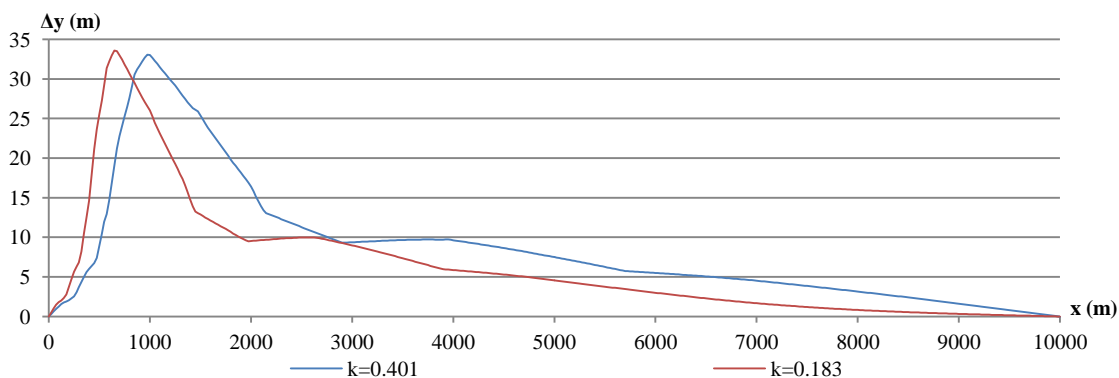


Figura 4.2 - Diferenças registradas na largura emersa da extensão de praia entre dois instantes, à escala do protótipo

Para o valor mais pequeno de k (0.183), registou-se uma diferença média da largura de praia de 6.43m (4.43% do comprimento do esporão) e um valor máximo de 33.59m (23.17% do comprimento do esporão) a 650m a barlar do esporão (figura 4.2). A maior diferença registada para $k=0.183$ é próxima da registada para $k=0.401$. Novamente, quanto maior o tempo de enchimento maior será a largura emersa de praia. Numa extensão de 1875m a barlar do esporão, cerca de 12.93 vezes o seu comprimento, registam-se diferenças iguais e superiores a 30% da diferença máxima.

Para o mesmo tempo de cálculo de 1.50 anos, e ambos os valores de k adotados obteve-se, naturalmente, uma posição de linha de costa mais afastada da linha de costa inicial para $k=0.401$, correspondendo a uma maior acumulação de sedimentos. Registou-se uma diferença média na largura de praia de 6.69m (4.61% do comprimento do esporão) e um valor máximo de 34.63m (23.88% do comprimento do esporão) a 650m a barlar do esporão (figura 4.3). As diferenças mais significativas observam-se numa extensão de 1900m a barlar do esporão, ou seja, numa extensão equivalente a 13.10 vezes o

comprimento do esporão. Entre os dois valores de k e um tempo de cálculo de 3.28 anos identifica-se um comportamento semelhante da variação das diferenças de largura de praia (figura 4.3). A largura de praia para $k=0.401$ é, em média, superior em 8.90m (6.14% do comprimento do esporão) relativamente à largura de praia obtida para $k=0.183$, possuindo uma diferença máxima de 34.23m (23.61% do comprimento do esporão) a cerca de 975m a barlar do esporão. Para um tempo de cálculo superior registam-se diferenças significativas numa maior extensão de praia, cerca de 2750m, 18.97 vezes o comprimento do esporão.

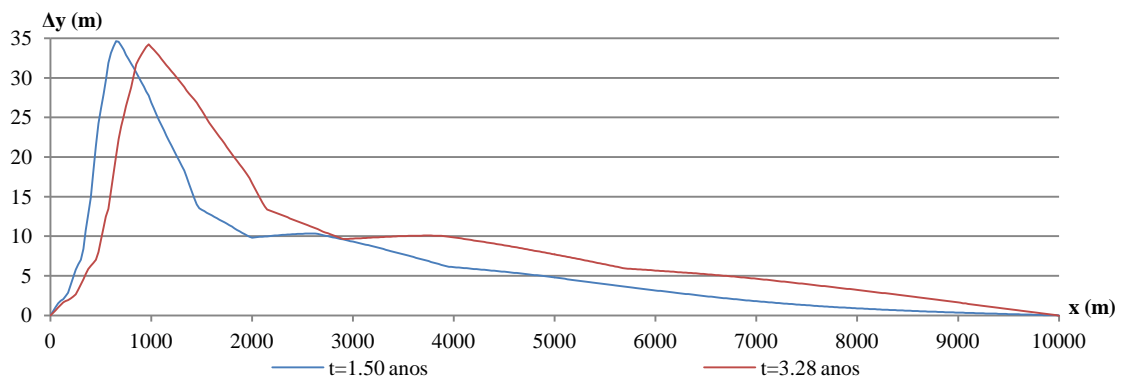


Figura 4.3 - Diferenças registadas na largura emersa da extensão de praia dois valores de k à escala do protótipo

As diferenças médias da largura de praia e a extensão onde se identificam as diferenças mais significativas, entre dois valores de k , são superiores para um intervalo de tempo de cálculo superior (pelo menos até 3.28 anos). No entanto, a diferença máxima registada nos dois intervalos de tempo é semelhante sendo ligeiramente superior para o intervalo de tempo de cálculo mais pequeno (1.50 anos).

As diferenças registadas nos cenários de análise são bastante reduzidas para todos os perfis (figura 4.4). Os perfis P1 a P5 apresentam uma geometria semelhante, existindo uma diminuição das cotas junto ao limite emerso, à medida que se afastam do esporão. Esta diminuição de cotas origina uma ligeira redução da largura emersa. Contudo, pode-se afirmar que a inclinação do perfil na zona submersa se mantém constante entre os 5 perfis. As diferenças entre os cenários para os mesmos 5 perfis tornam-se maiores à medida que os perfis se afastam do esporão (figura 4.4a à 4.4e).

Os perfis P6 a P9 apresentam uma geometria semelhante, com a respetiva diminuição de cotas à medida que os perfis se afastam do esporão, originando uma diminuição da largura emersa. As diferenças registadas entre os diversos cenários para o mesmo perfil diminuem

à medida que os perfis se afastam do esporão. Para o perfil P9 as variações das cotas quase não são observáveis. Estes 4 perfis possuem uma inclinação inferior quando comparados com os 5 perfis mais próximos à estrutura transversal (figura 4.4f à 4.4i).

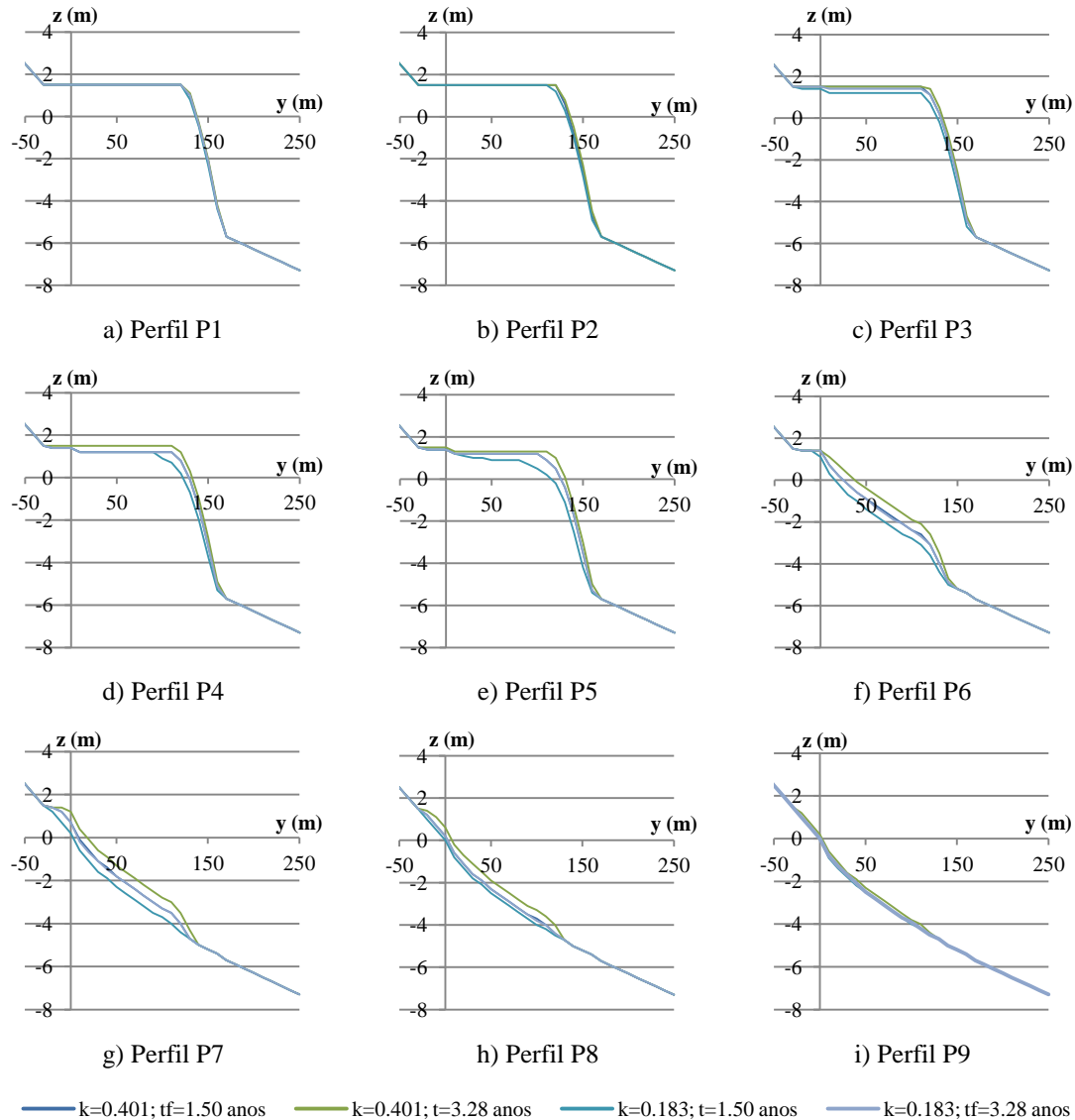


Figura 4.4 - Perfis transversais para as combinações dos valores de k e tempos de enchimento, à escala do protótipo

4.3.2. Equilíbrio

Utilizando o LTC, tentou-se prolongar a simulação até se alcançar a configuração de equilíbrio da linha de costa e dos perfis transversais da praia, para os dois valores de k utilizados (figura 4.5). Foram analisadas as diferenças de posição entre dois tempos de corrida, sempre crescentes, até se verificar uma estabilização da posição da linha de costa.

Para assegurar que a praia alcançasse o equilíbrio foi realizada uma última análise para um tempo de cálculo de 350000 horas (equivalente a 39.95 anos).

Olhando à figura 4.5, observam-se diferentes posições para os mesmos instantes de cálculo, para dois valores diferentes do coeficiente de transporte sedimentar, até ao alcance do equilíbrio. No entanto a posição da linha de costa após cerca de 40 anos é aproximadamente igual, como se observa na figura 4.6.

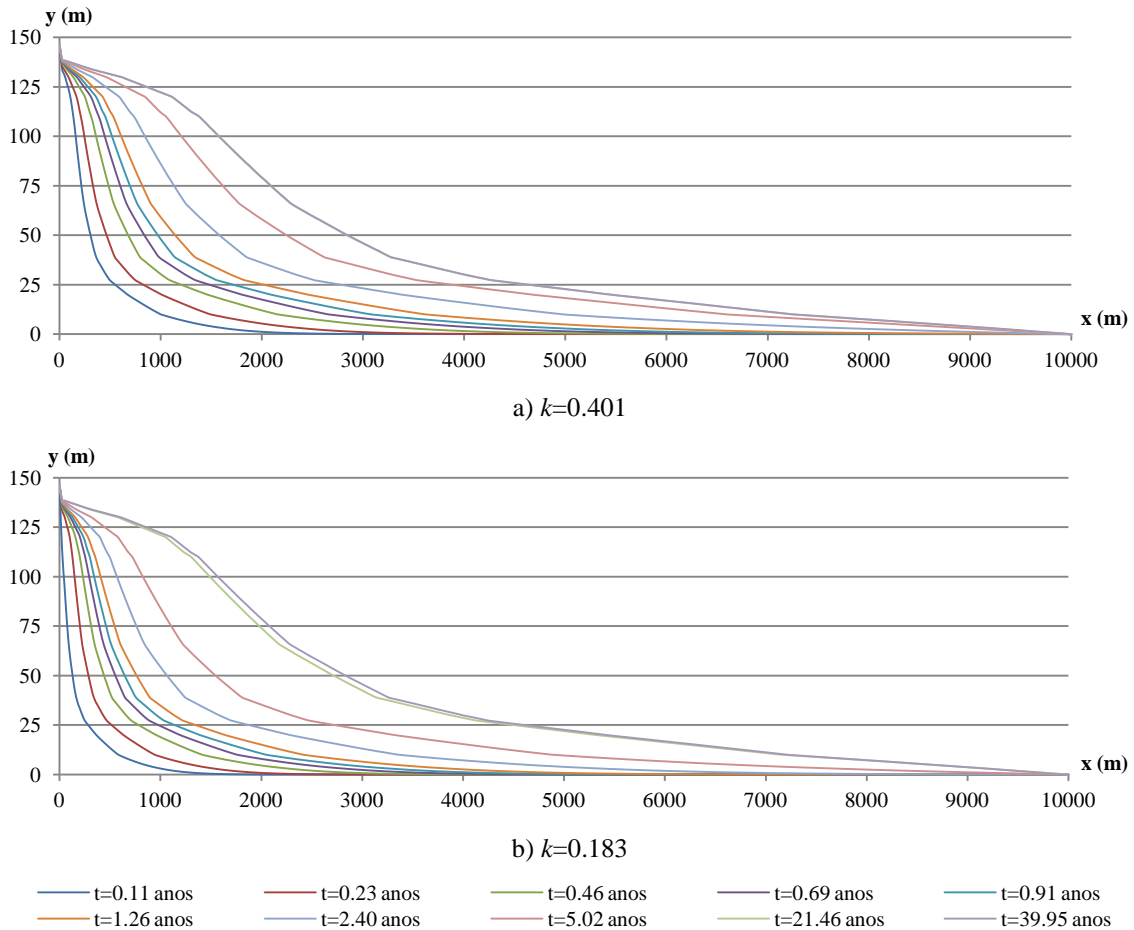


Figura 4.5 - Evolução da linha de costa até ao alcance do equilíbrio, para dois valores de k , à escala do protótipo

A diferença média entre as duas linhas de costa é de cerca de 0.14cm (0.10% do comprimento do esporão), sendo desprezável tendo em conta a largura máxima de praia que ronda os 145m. O último ponto que regista uma diferença superior ou igual a 30% da diferença máxima registada de 0.52m (0.36% do comprimento do esporão) encontra-se afastado do esporão em 3875m (26.72 vezes o comprimento do esporão).

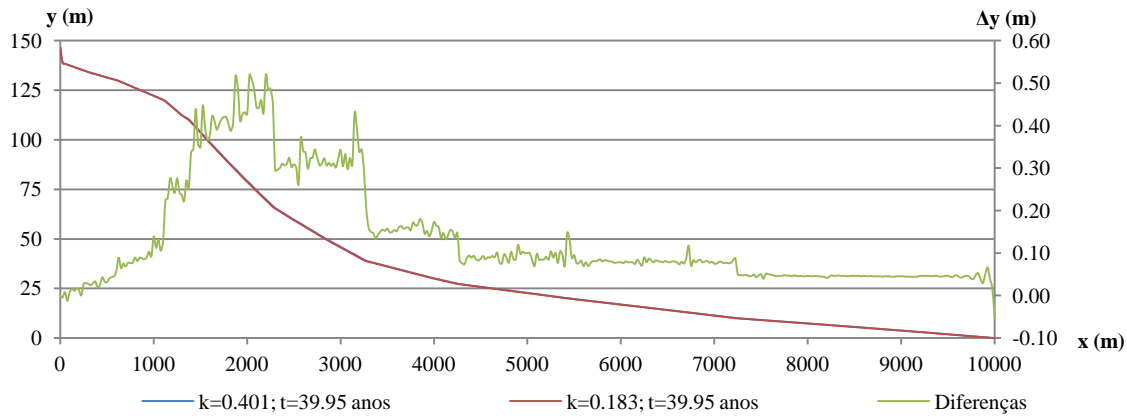


Figura 4.6 - Posição da linha de costa em equilíbrio e respectivas diferenças, para dois valores de k , à escala do protótipo

A evolução da largura emersa dos perfis transversais no LTC segue um comportamento semelhante ao da formulação analítica de Pelnard-Considère (1956), com a principal diferença de que os perfis não alcançam uma largura igual ao comprimento do esporão (figura 4.7). Com a diminuição do valor de k existe uma diminuição da velocidade com que os perfis evoluem, tendendo, cada perfil para um valor de largura definido, igual para ambos os valores do coeficiente de transporte.

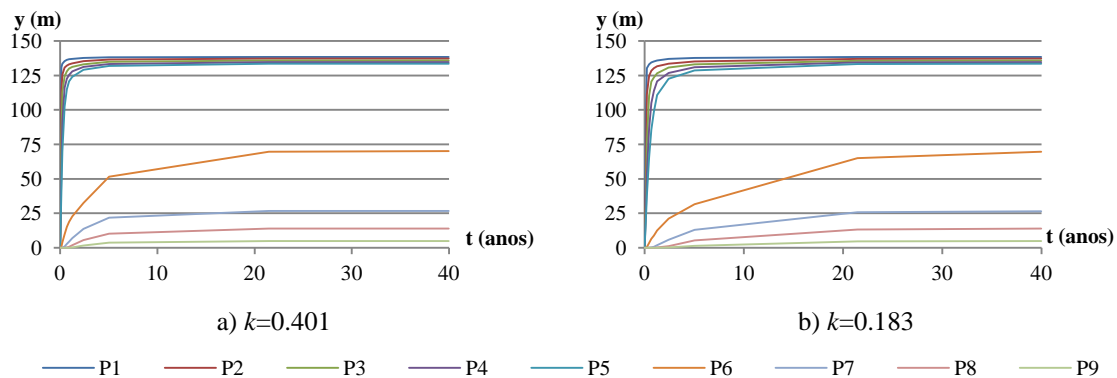


Figura 4.7 - Evolução da largura da praia no protótipo, segundo o LTC

Apenas os perfis P1 a P5 se aproximaram de um valor de largura emersa muito próximo da extensão do esporão, com um registo superior a 92% do comprimento do esporão, para ambos os valores de k . O perfil mais distante (P9) registou um aumento da largura emersa em 3.30% do comprimento do esporão, para ambos os valores do coeficiente de transporte. Analisando os perfis transversais, representados na figura 4.8 identifica-se uma semelhança geométrica, com uma inclinação quase idêntica entre os primeiros 5 perfis (P1 a P5). Do P6 até ao P9 identifica-se uma diminuição crescente das cotas, inicialmente mais

significativas junto ao limite da zona emersa. As diferenças entre perfis, para ambos os valores de k , são desprezáveis.

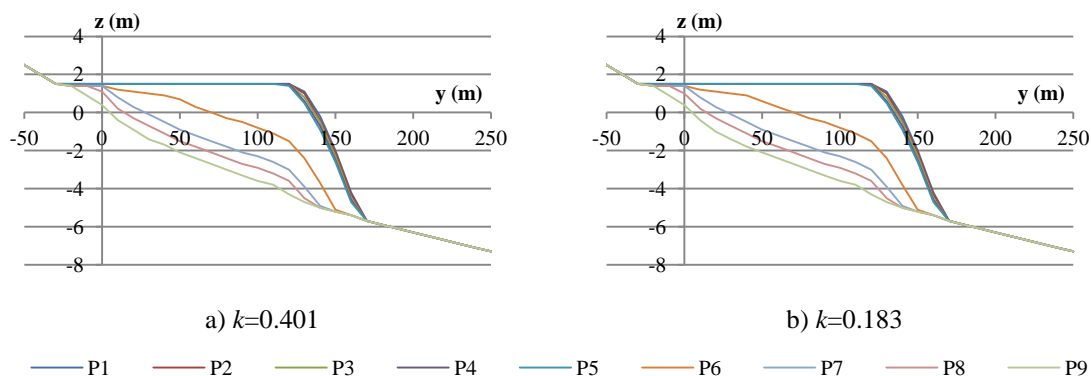


Figura 4.8 - Perfis transversais de uma praia em equilíbrio, segundo o LTC à escala do protótipo

4.4. Simulação à escala do modelo

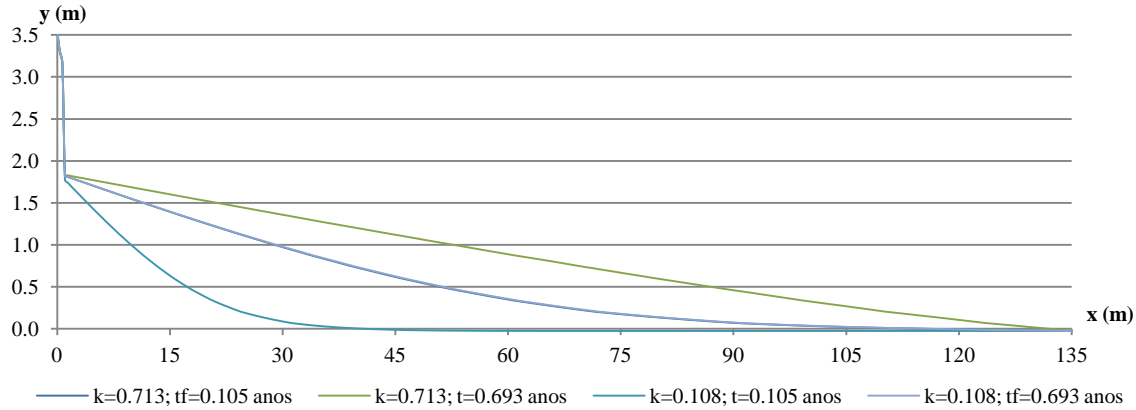
Neste subcapítulo é feita uma análise idêntica à realizada para o protótipo: é feita a descrição do modelo numérico à escala do modelo; é analisada a evolução da linha de costa e dos perfis transversais para o tempo de enchimento definido por Pelnard-Considère; e analisada uma situação de equilíbrio. Novamente, o cenário de referência para o modelo é o cenário que se mantém constante entre todas as análises, cujas propriedades estão descritas nas tabelas 2.1 à 2.4.

4.4.1. Tempo de enchimento

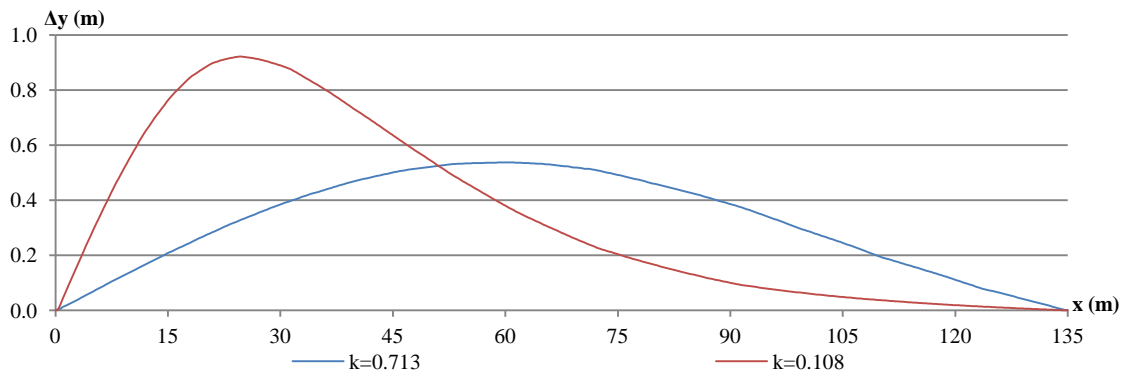
O valor de $k=0.713$ origina um tempo de enchimento de 0.105 anos, correspondente a 917 horas de simulação, e o valor de $k=0.108$ origina um tempo de enchimento de 0.693 anos, correspondente a 6075 horas. A posição da linha de costa para o instante de enchimento é aproximadamente igual, como se constata pela figura 4.9, tal como se tinha observado no protótipo.

As diferenças da largura de praia entre os dois valores de k , para o tempo de enchimento respetivo, são mínimas, rondando um valor médio de 3.52mm (0.10% do comprimento do esporão), registando uma diferença máxima de 4.97mm (0.15% do comprimento do esporão). Para o valor de $k=0.713$, a diferença média registada, entre os dois intervalos de tempo de cálculo, foi de 31.98cm (9.41% do comprimento do esporão), tendo-se obtido um valor máximo absoluto de 53.71cm (15.80% do comprimento do esporão) a uma distância de 60.75m do esporão, como se observa na figura 4.10. Assumindo novamente as

diferenças mais significativas como aquelas iguais ou superiores a 30% do valor da máxima diferença, observa-se que estas ocorrem numa extensão de 114.08m (33.55 vezes o comprimento do esporão), contabilizada desde o esporão.



Para o valor de $k=0.108$, comparando os dois intervalos de tempo referidos anteriormente, registam-se maiores diferenças do que para $k=0.713$, obtendo-se um valor máximo de 92.24cm (27.13% do comprimento do esporão) a uma distância de 24.64m (7.25 vezes o comprimento do esporão) do esporão, representando um aumento da diferença máxima obtida para $k=0.713$ de 71.74%. Obteve-se um valor médio das diferenças de 34.51cm (10.15% do comprimento do esporão), valor 7.91% superior ao valor da diferença média para o maior valor de k .



Conclui-se que apesar do aumento da largura de praia, devido ao aumento de cotas, as maiores diferenças médias e máximas entre dois tempos de corrida (iguais para dois valores de k) ocorrem para o menor valor de k . A diferença máxima observa-se mais

próxima ao esporão para o menor valor do coeficiente de transporte sedimentar (figura 4.10).

Comparando os resultados obtidos para entre os dois valores de k , para dois tempos de simulação idênticos, observa-se uma diminuição do valor das diferenças quanto maior for tempo de cálculo. Para um tempo de cálculo de 0.105 anos regista-se uma diferença média de largura de praia de 34.16cm (10.05% do comprimento do esporão) e uma diferença máxima de 91.79cm (cerca de 27% do comprimento do esporão), a 24.64m do esporão (7.25 vezes o comprimento do esporão), observáveis na figura 4.11.

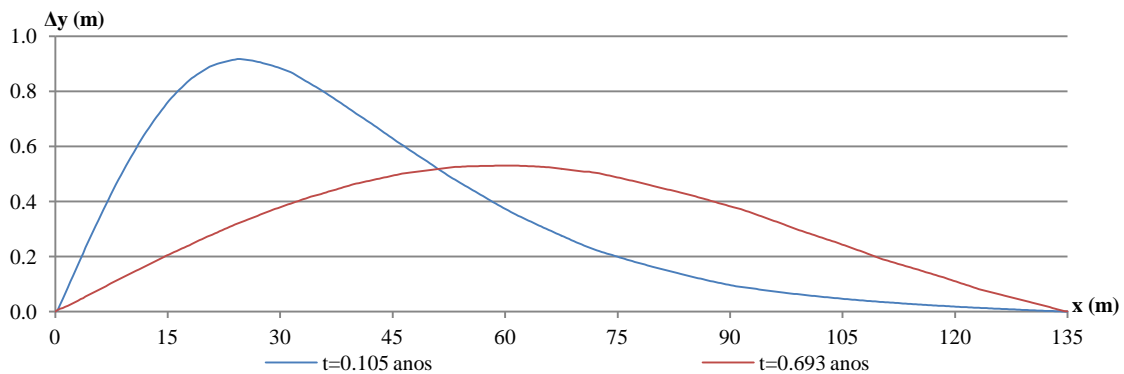


Figura 4.11 - Diferenças registadas na largura emersa da extensão de praia dois valores de k à escala do modelo

Para um tempo de cálculo superior de 0.693 anos, observa-se um valor médio das diferenças de 31.63cm (9.30% do comprimento do esporão) e um valor máximo de 53.07cm (15.61% do comprimento do esporão), a 61.43m do esporão (18.07 vezes o comprimento do esporão), como se observa na figura 4.11. As diferenças mais significativas ocorrem numa extensão de 67.5m (19.85 vezes o comprimento do esporão) e 114.08m (33.55 vezes o comprimento do esporão) para os intervalos de tempo de cálculo de 0.105 anos e 0.693 anos, respetivamente.

As maiores diferenças de cotas nos perfis transversais ocorrem no perfil P1, e nos perfis P6 a P9 (figura 4.12). O perfil P1 possui a mesma largura emersa para todos os cenários, possuindo apenas menores cotas para o valor de $k=0.108$ e para o tempo de cálculo de 0.105 anos, mantendo a inclinação do talude aproximadamente igual para todos os cenários.

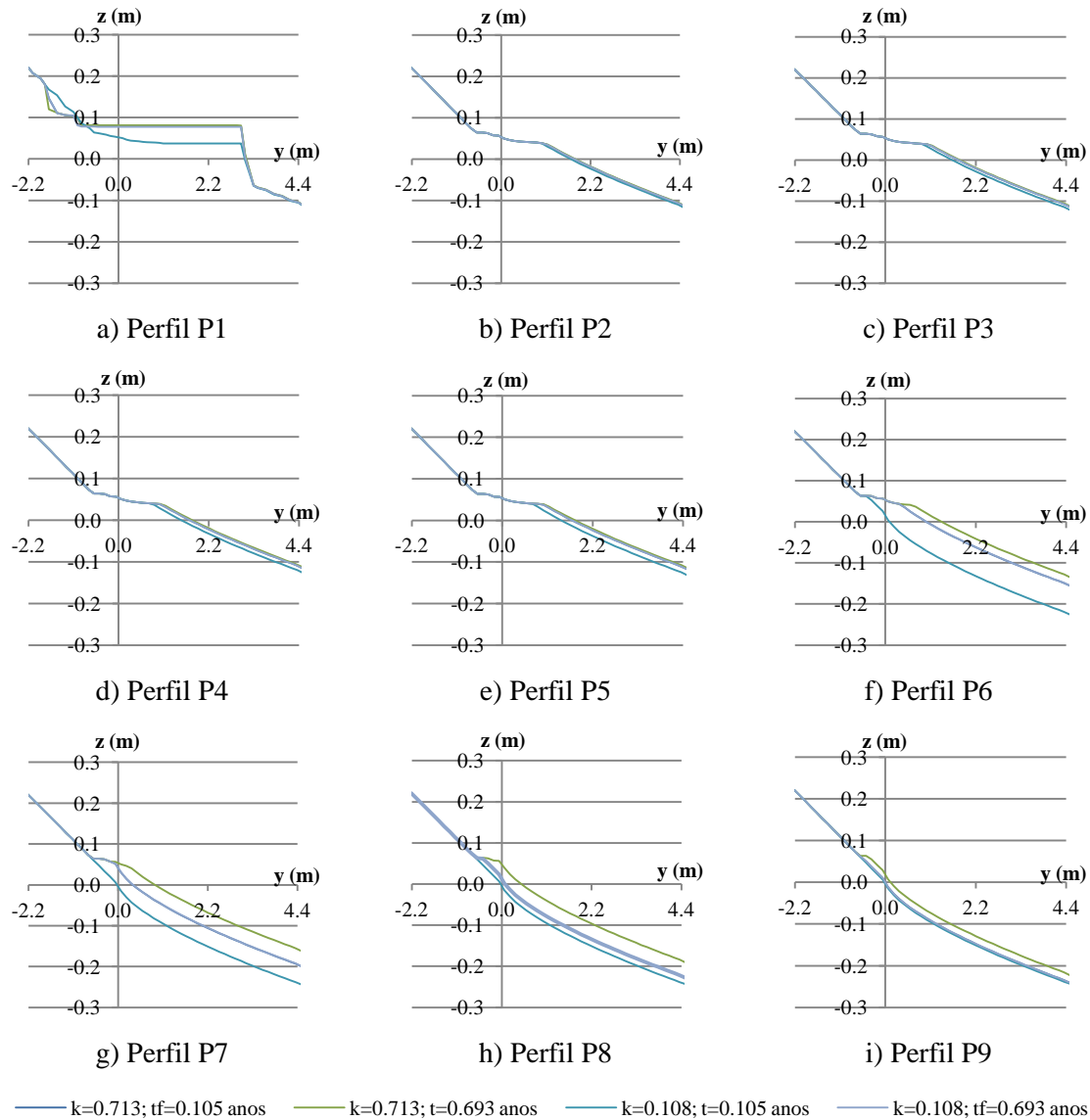


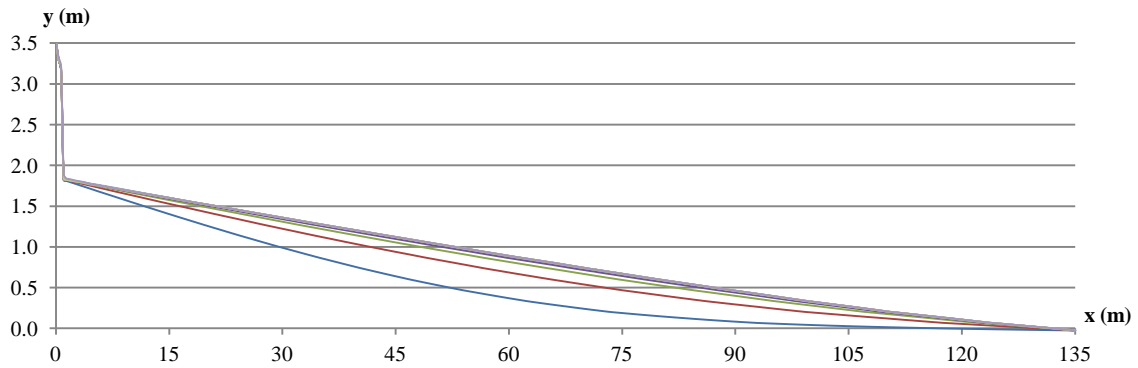
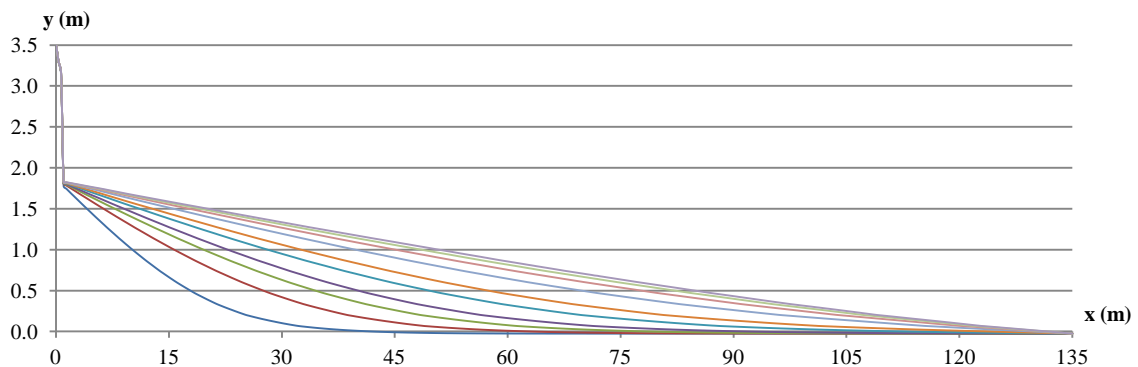
Figura 4.12 - Perfis transversais para as combinações dos valores de k e tempos de enchimento, à escala do modelo

Do perfil P6 ao perfil P9 observam-se maiores diferenças de cotas, onde os cenários para $k=0.713$ e um tempo de cálculo é de 0.693 anos, possuem uma maior altura média, bem como, uma maior largura emersa. Os perfis para o cenário $k=0.108$ e tempo de cálculo de 0.105 anos possuem a menor altura média bem como o menor valor de largura emersa. A altura média e a largura emersa diminuem à medida que os perfis se afastam do esporão.

4.4.2. Equilíbrio

Também para o modelo, utilizando o LTC, tentou-se obter a configuração de equilíbrio da linha de costa, para ambos os valores de k seleccionados (figura 4.13). Para um valor de

tempo de simulação de 20000 horas, as diferenças da largura de praia, na extensão analisada eram já reduzidas. De modo a garantir a presença de diferenças mínimas foi feita uma análise para um tempo de cálculo de 25000 horas, correspondente a 2.854 anos.

a) $k=0.713$ a) $k=0.108$

— $t=0.114$ anos — $t=0.228$ anos — $t=0.342$ anos — $t=0.457$ anos — $t=0.685$ anos
 — $t=0.913$ anos — $t=1.370$ anos — $t=1.826$ anos — $t=2.283$ anos — $t=2.854$ anos

Figura 4.13 - Evolução da linha de costa até ao alcance do equilíbrio, para dois valores de k , à escala do modelo

À semelhança do que acontece para o protótipo, entre dois valores de k , observam-se diferentes posições para os mesmos instantes de cálculo, até que o equilíbrio é alcançado (figura 4.13).

A diferença média entre as duas linhas de costa é de cerca de 2.16cm, representando 0.53% do comprimento do esporão. Esta foi assumida como desprezável por representar um valor inferior a 1.00%, dos 3.40m de comprimento do esporão. A diferença máxima registada foi de 6.45cm (1.90% do comprimento do esporão), a 1.01m a barlar do esporão, mas o valor é localizado, descendo significativamente (76%) no perfil consecutivo. Assim, este comportamento local foi desprezado, assumindo-se um valor para a diferença máxima de 3.72cm (1.09% do comprimento do esporão), a 66.50m do esporão. Registou-se um valor

de 116.10m (31.15 vezes o comprimento do esporão) para a extensão de praia onde se observam as diferenças mais significativas relativamente à diferença máxima assumida (figura 4.14).

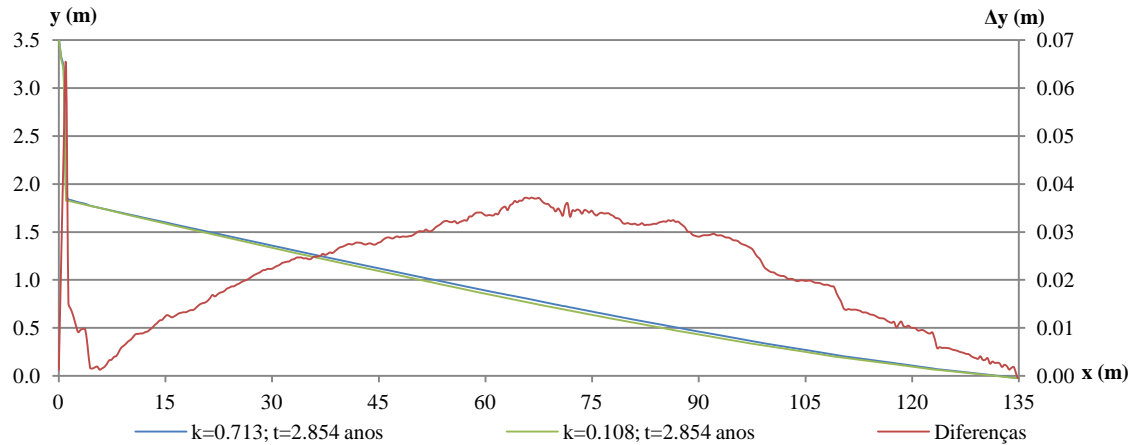


Figura 4.14 - Posição da linha de costa em equilíbrio e respetivas diferenças, para dois valores de k , à escala do modelo

No modelo, como ocorre no protótipo, os perfis não alcançam uma largura emersa equivalente ao valor da extensão do esporão (figura 4.15), mas sim um valor mais reduzido, cada vez mais pequeno à medida que estes se afastam da estrutura transversal. Este valor é igual para ambos os valores do coeficiente de transporte sedimentar. A diminuição do valor de k origina uma diminuição da velocidade com que os perfis alcançam um determinado valor da largura emersa. Este atraso é mais notável à medida que os perfis se afastam do esporão. É de salientar a diferença do valor máximo da largura emersa de equilíbrio entre o perfil P1 e os perfis imediatamente a barlar (P2 a P5), com uma redução de quase 50% do valor.

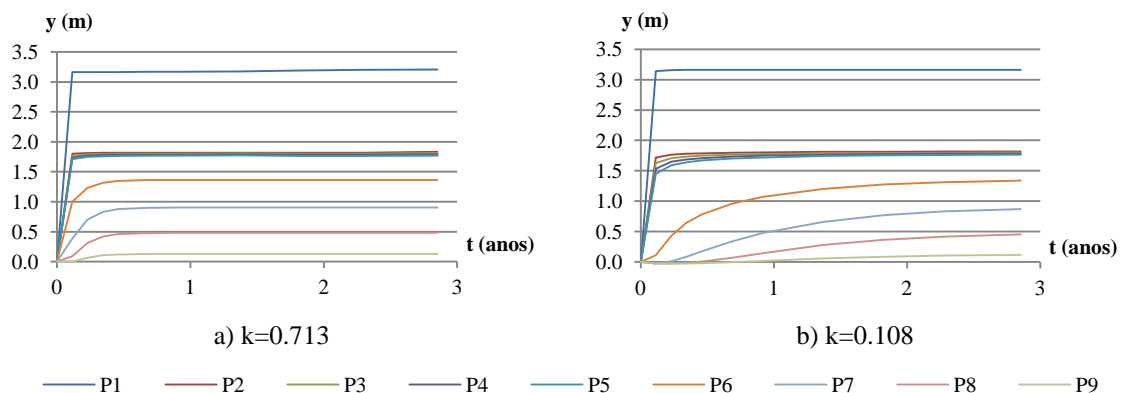


Figura 4.15 - Evolução da largura da praia no modelo, segundo o LTC

No modelo apenas o perfil P1 se aproxima de um valor de largura emersa próximo do comprimento do esporão, como acontece no protótipo. Este é o único com uma largura emersa em equilíbrio superior a 92% do comprimento da estrutura para ambos os valores de k . O perfil mais afastado (P9) apresenta um aumento da largura emersa em cerca de 4%, sendo o perfil com o menor aumento de largura numa situação de equilíbrio. Os perfis P2 a P5 apresentam valores de largura emersa muito semelhantes, para ambos os valores do coeficiente de transporte sedimentar, representando entre 51% e 54% do comprimento da estrutura transversal (figura 4.16).

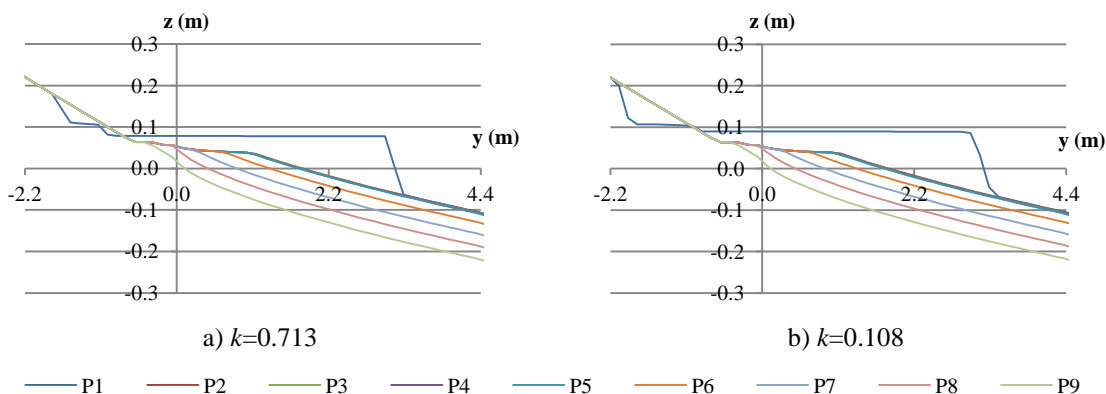


Figura 4.16 - Perfis transversais de uma praia em equilíbrio segundo o LTC (modelo)

Analisando os perfis transversais em equilíbrio, identifica-se uma semelhança geométrica entre todos os perfis para ambos os valores de k . Apenas o perfil P1 possui diferenças, nas cotas na zona emersa, onde o maior valor de k origina um perfil com cotas ligeiramente superiores em quase toda a extensão analisada.

4.5. Comparação entre protótipo e modelo

Numa tentativa de identificar semelhanças na evolução da largura emersa dos perfis entre o modelo e o protótipo, após a aplicação do LTC, foi analisada a evolução da largura emersa relativa ao comprimento do esporão ao longo do tempo expresso em função da proporção com o máximo tempo de enchimento (figura 4.17 e 4.18).

Os perfis que registam uma evolução relativa semelhante (entre protótipo e modelo), para ambos os valores de k , são os perfis P1 e P9. Os perfis P2 a P5 possuem uma valor final de largura emersa relativa superior para o protótipo.

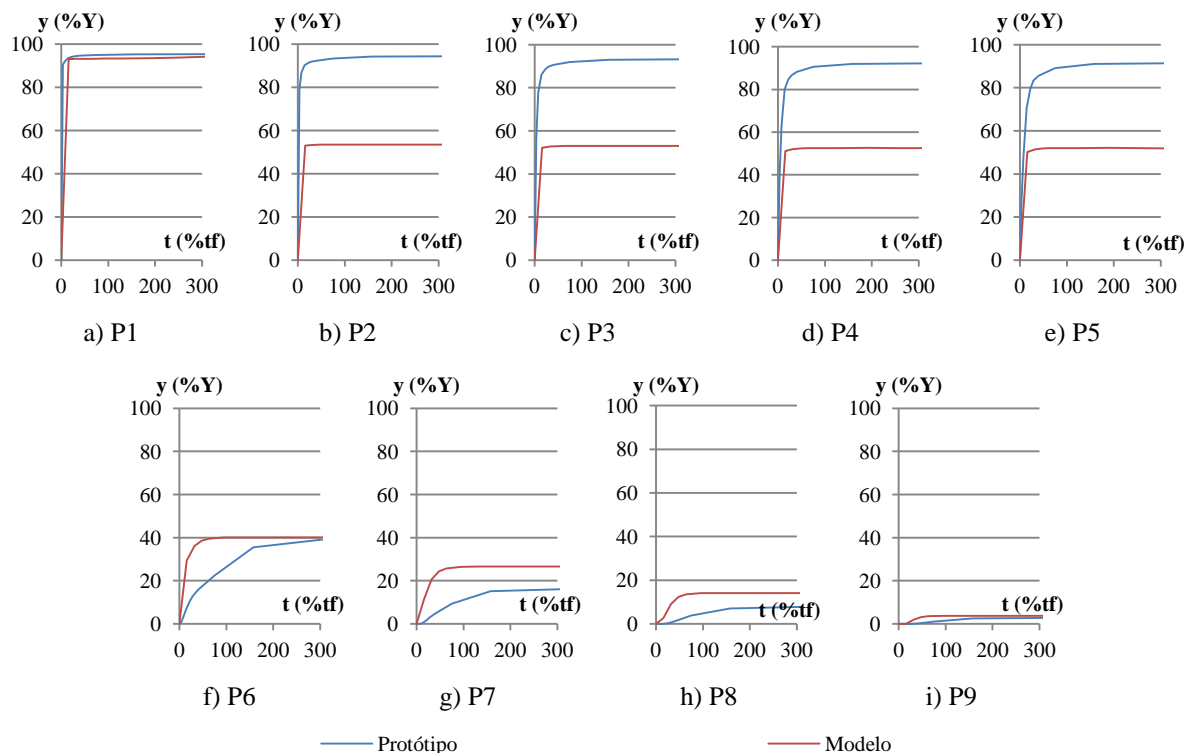


Figura 4.17 - Evolução da largura emersa relativa dos perfis, à escala do protótipo e do modelo, para o valor máximo do coeficiente de transporte, ao longo do tempo, segundo o LTC

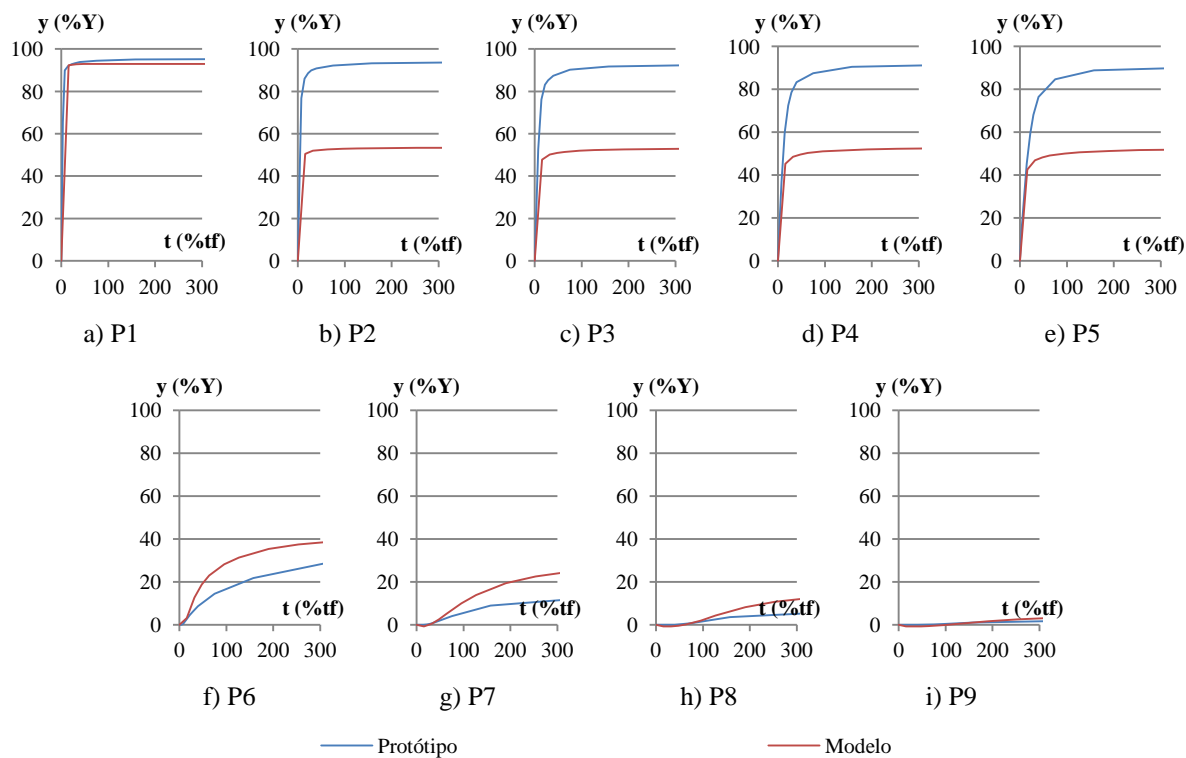


Figura 4.18 - Evolução da largura emersa relativa dos perfis, à escala do protótipo e do modelo, para o valor mínimo do coeficiente de transporte, ao longo do tempo, segundo o LTC

O perfil P6 possui um valor final da largura emersa relativa semelhante em protótipo e modelo, para um instante de 3 vezes o maior tempo de enchimento. Os restantes perfis possuem um valor final da largura emersa inferior no protótipo. Do perfil P6 ao perfil P9 o modelo regista maiores larguras durante todo o intervalo de tempo analisado.

As diferenças entre os valores das larguras para o perfil P1 no protótipo e no modelo são de 1.10% e 2.50% para o maior e menor valor do coeficiente de transporte sedimentar, respetivamente. Os perfis P2 ao P5 apresentam diferenças, entre protótipo e modelo, superiores a 40% para ambos os valores de k . Do perfil P6 ao P9, para ambos os valores do coeficiente de transporte, a maior diferença absoluta registada, entre protótipo e modelo, foi de 8.30% e 8.60%, para o valor máximo e mínimo de k .

Capítulo 5

MODELAÇÃO FÍSICA EM LABORATÓRIO

5. Modelação física em laboratório

Este capítulo é dedicado à análise e discussão dos resultados obtidos a partir da modelação física de uma praia a barlar de um esporão construído em laboratório, à escala reduzida. O modelo aqui estudado corresponde ao modelo descrito no capítulo 2, nas tabelas 2.1 à 2.4.

O estudo teve como objetivos identificar a evolução da geometria dos perfis transversais a barlar de um esporão, na tentativa de identificar a forma do um perfil de equilíbrio associado a uma determinada onda e o comportamento do perfil a diferentes distâncias do esporão. Este procedimento permite comparar os resultados do modelo físico com as formulações analíticas existentes (perfil de Dean) e com as configurações em planta (LTC e Pelnard-Considère).

5.1. Procedimento geral

Os ensaios consistiram em submeter a praia a agitação regular durante um intervalo de tempo conhecido, registando a geometria do perfil transversal ao longo dos ensaios.

Foram realizados 2 ensaios durante este estudo. O primeiro ensaio consistiu numa praia em equilíbrio sujeita a agitação (regular) com uma direção perpendicular à linha de costa, avaliando a forma do perfil de equilíbrio. O segundo tratou-se de uma extensão de praia a barlar de um esporão, sujeita a agitação ao largo com uma orientação de 10° com a perpendicular à linha de costa, permitindo avaliar a forma do perfil transversal a diferentes distâncias do esporão. Ambos os cenários de análise foram definidos com características iniciais conhecidas da morfologia da praia.

Os meios utilizados para definir o perfil transversal da praia no laboratório não permitiram garantir a mesma forma do perfil em toda a extensão da praia (figura 5.1). Através de um perfilador foi possível medir os perfis em locais previamente definidos em cada ensaio. Foram controlados, ao longo do tempo, 2 perfis durante o primeiro ensaio e 5 perfis durante o segundo ensaio.

Para minimizar erros, optou-se por realizar 3 medições para cada perfil do primeiro ensaio e 2 medições para cada perfil do segundo ensaio, permitindo estimar diferenças e valores representativos. Assim, a geometria dos perfis ao longo do tempo foi admitida igual à média das medições em cada instante. Em alguns casos, foram detetados erros em algumas

leituras, e como tal, o conjunto total ou parcial de dados de uma das medições foi substituído pelos valores da outra (que se considerou que efetivamente estaria correta). Após a preparação da praia procedeu-se ao enchimento do tanque, observando-se assentamentos em várias zonas junto aos pés do suporte do perfilador e junto ao limite lateral do tanque (figura 5.2a e 5.2b, respetivamente).



Figura 5.1 - Ferramentas utilizadas para a preparação da praia em laboratório



a) Assentamentos junto aos pés do suporte do perfilador



b) Assentamentos junto à parede lateral do tanque

Figura 5.2 - Assentamentos após enchimento do tanque

Durante o decorrer dos ensaios, para o registo da agitação foram colocadas três sondas alinhadas paralelamente à praia de modo a se proceder ao controlo da altura e período de onda.

5.2. Ensaio sem esporão

Como referido, o primeiro ensaio foi realizado com o objetivo de verificar se a forma do perfil transversal se mantém em equilíbrio para condições de agitação marítima regulares e constantes.

Foram monitorizadas através de um perfilador, dois perfis transversais localizados sensivelmente a meio da extensão da praia, afastados um metro entre si (figura 5.3a). Foi utilizada a janela lateral do tanque (figura 5.3b) para o controlo do perfil de praia e monitorização manual da altura da onda, de modo a assegurar o correto desenvolvimento da atividade laboratorial. A posição dos suportes do perfilador foi condicionada pela presença da praia dissipativa, mas visou a medição da maior extensão possível do perfil ativo. Os perfis foram identificados como perfil PT1 e PT2, na perspetiva de caracterizar a sua geometria numa possível situação de equilíbrio.



a) Localização dos perfis transversais

b) Perfil transversal da praia

Figura 5.3 - Ensaio sem esporão

A geometria pretendida para o perfil transversal afastou-se um pouco do previsto inicialmente, em função dos meios operacionais existentes no laboratório, originando um perfil variável ao longo da extensão da praia, como se observa nas figuras 5.3b e 5.4.

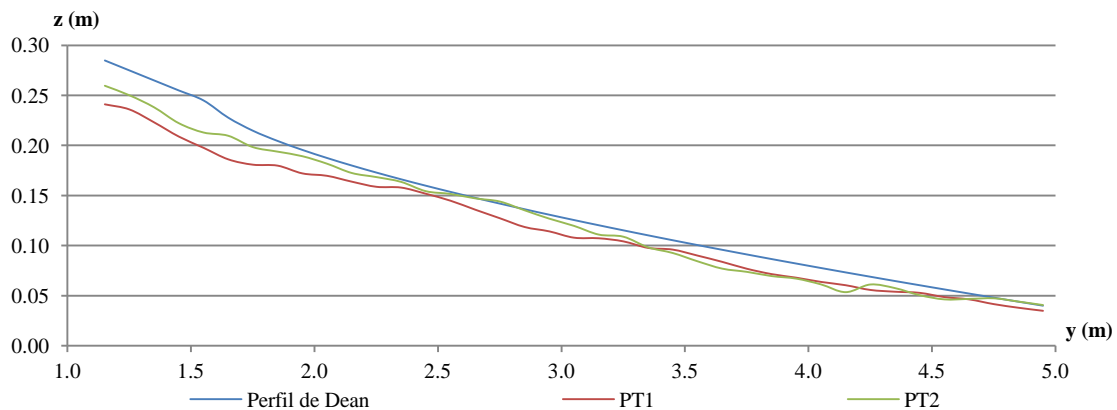


Figura 5.4 - Perfil de Dean previsto como perfil inicial e os perfis transversais iniciais reais PT1 e PT2

Analisando as diferenças entre os perfis e o perfil de Dean registam-se diferenças médias de 1.79cm e 1.11cm e diferenças máximas de 4.74cm e 3.27cm, para os perfis PT1 e PT2 respetivamente. Comparando as diferenças com a altura de água de 24cm, observa-se que

as diferenças médias são de cerca de 6% do valor da altura de água e as diferenças máximas rondam os 17% da altura de água, considerando-se que os perfis finais se aproximam razoavelmente da configuração pretendida.

5.2.1. Evolução do perfil transversal

A análise dos dois perfis monitorizados permitiu observar comportamentos semelhantes ao longo do tempo, bem como uma geometria final próxima (figura 5.5). Os perfis foram monitorizados em intervalos de 30 minutos até ao fim das primeiras 3 horas do ensaio, passando depois a ser monitorizados a cada 60 minutos, até ao fim do ensaio (6 horas).

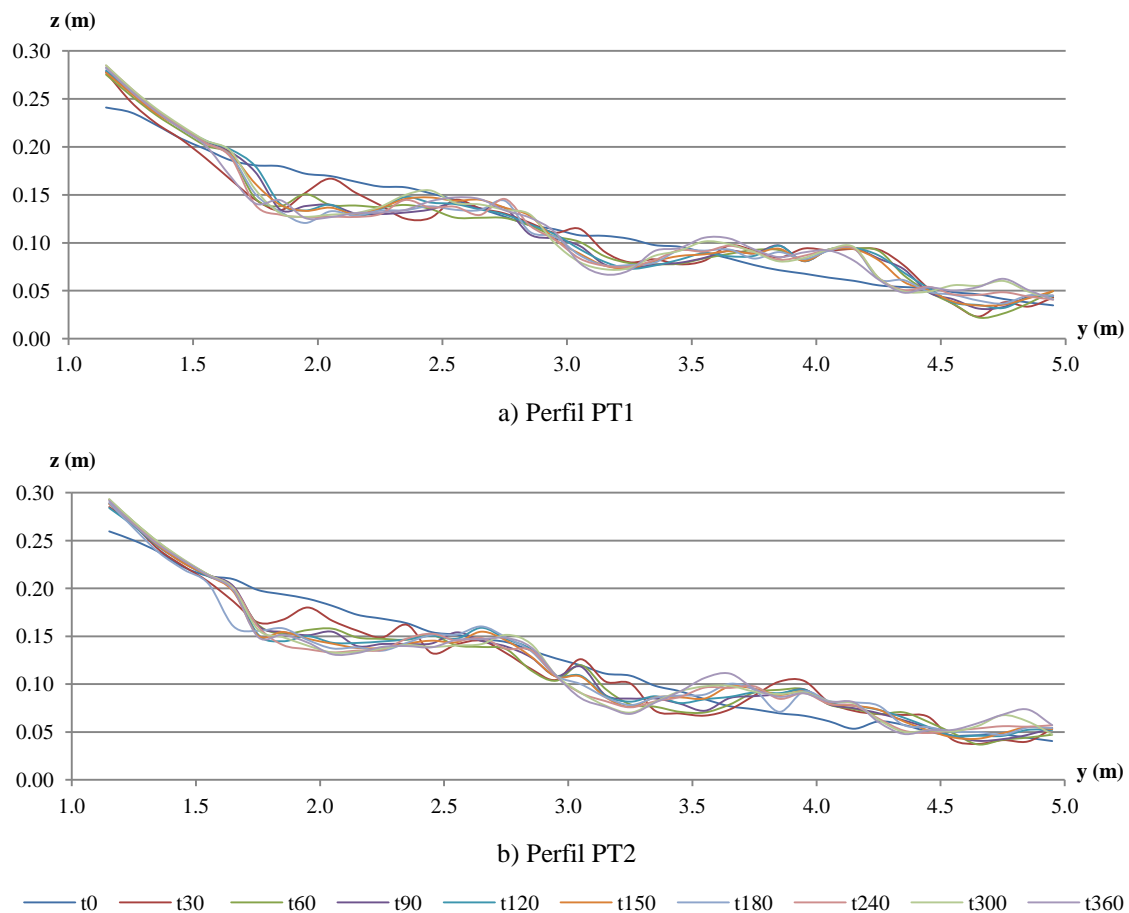


Figura 5.5 - Representação da evolução dos perfis transversais, ao longo do ensaio sem esporão

Nos primeiros 30 minutos do ensaio, a altura de onda foi superior aos 5.40cm pretendidos, tendo sido registada uma altura do dobro da pretendida (10.80cm). Após os primeiros 30 minutos ajustou-se o equipamento para os valores pretendidos.

Verificou-se a presença de duas bermas submersas e de uma terceira junto ao limite inferior do perfil analisado. Ambas as bermas são visíveis nos dois perfis monitorizados e

possuem posições muito próximas. No instante $t=30\text{min}$ observa-se a existência de bermas, ainda não muito bem definidas, mas numa zona do perfil diferente da posição das bermas finais (figura 5.6), isto porque durante o primeiro intervalo de meia hora a altura de onda registada foi superior ao restante tempo de ensaio, tendo também dado origem a configurações de fundo semelhantes às finais mas mais espaçadas entre si.

A ondulação das linhas que definem a forma do perfil transversal pode ser devida à presença de formas de fundo bem como de outras irregularidades, como a presença de brita no fundo e areia mais grosseira junto à zona de rebentação.

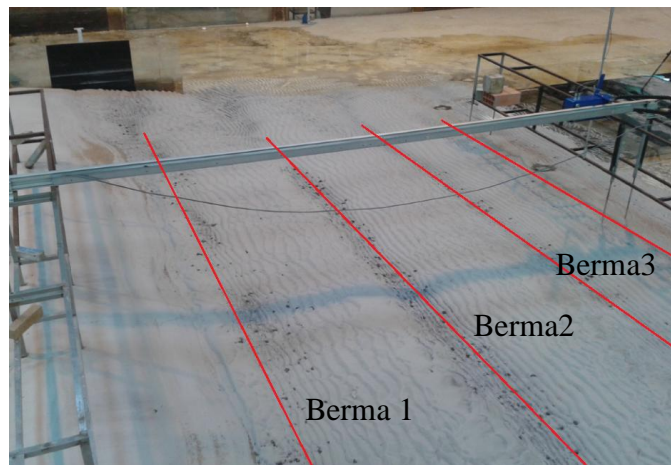


Figura 5.6 - Identificação visual das bermas submersas no final do ensaio

A partir do instante $t=240\text{min}$ observam-se variações menos significativas das cotas ao longo dos vários pontos do perfil, tendo-se assumido que o perfil poderá ter atingido o equilíbrio a partir desse instante. A tendência do perfil para o equilíbrio foi definida como a diminuição das diferenças entre as cotas do perfil ao longo do tempo de ensaio e a diminuição da dispersão do valor das cotas entre os vários pontos do perfil. Para avaliar a evolução no tempo foi calculada a variação absoluta média das cotas ao longo de todo o perfil (foram considerados 39 pontos ao longo da extensão do perfil separados entre si 10cm, comuns a ambos os perfis). Nessa análise observou-se que existiam pontos que não estavam em equilíbrio em nenhum dos dois perfis monitorizados, bem como pontos que não estavam em equilíbrio em apenas um dos perfis (figura 5.7).

Na figura 5.7a encontra-se representada a variação das diferenças em altura ao longo do tempo para o ponto 1 de ambos os perfis, identificando-se uma redução inicial (até ao instante $t=120\text{min}$), das diferenças para ambos os perfis, registando-se nos instantes compreendidos entre os 120 e os 240 minutos um aumento brusco das diferenças seguido

de uma diminuição das mesmas para o perfil PT1 e um aumento gradual para o PT2. A partir do instante $t=240\text{min}$, instante assumido como o mais provável para a identificação do equilíbrio, existe um comportamento divergente, na medida em que para o perfil PT1 a variação das cotas é quase nula (0.013mm/min) e para o perfil PT2, apesar da taxa média de variação das alturas se manter aproximadamente constante durante o resto do ensaio, a taxa registada ronda um valor cerca de 13 vezes superior ao registado no perfil PT1.

O ponto 22 (figura 5.7b) apresenta diferenças iniciais muito altas para o PT1, existindo intervalos de tempo que também apresentam diferenças significativas entre os perfis. No entanto, apresenta a mesma taxa média de variação de altura entre os instantes $t=300\text{min}$ e $t=360\text{min}$ para ambos os perfis, apesar de ser um valor diferente de zero (0.057mm/min).

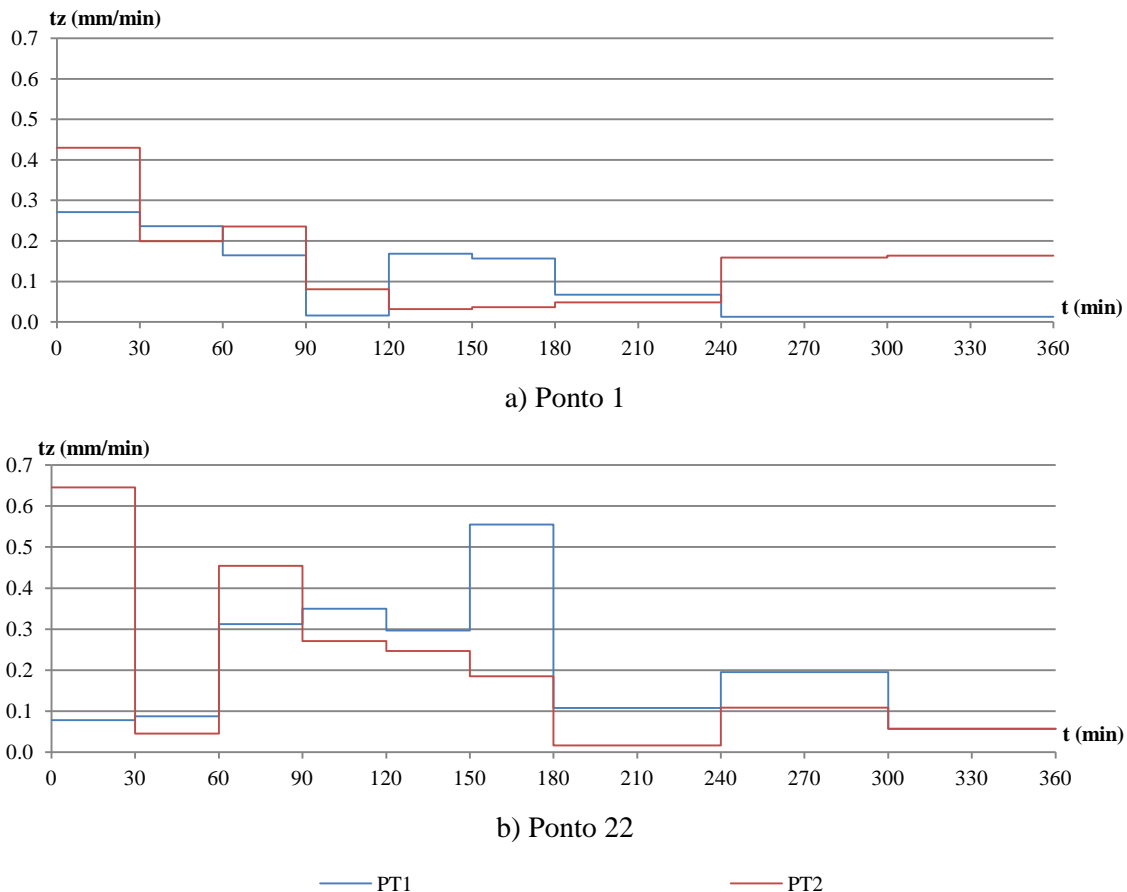


Figura 5.7 - Taxas médias (t_z) das diferenças absolutas da altura (Δz) do perfil ao longo do ensaio, em ambos os perfis analisados nos pontos 1 e 22 (ensaio sem esporão)

Apesar de comportamentos pontuais diferentes, possivelmente relacionados com as próprias formas do fundo, avaliando a variação média das diferenças absolutas de cotas dos perfis, ao longo do tempo e o desvio padrão das mesmas, representadas nas figuras 5.8 e 5.9, respetivamente, observa-se uma tendência de diminuição de ambos os parâmetros,

demonstrando a aproximação a uma situação de equilíbrio. Para o perfil PT2 registam-se os valores mais reduzidos finais das diferenças médias absolutas e do desvio padrão, de 0.052mm/min e 0.054mm/min, respetivamente. No perfil PT1 os valores finais dos mesmos parâmetros não correspondem aos valores mínimos registados, os valores finais são 0.089mm/min e 0.090mm/min, enquanto os valores mínimos são 0.062mm/min e 0.054mm/min.

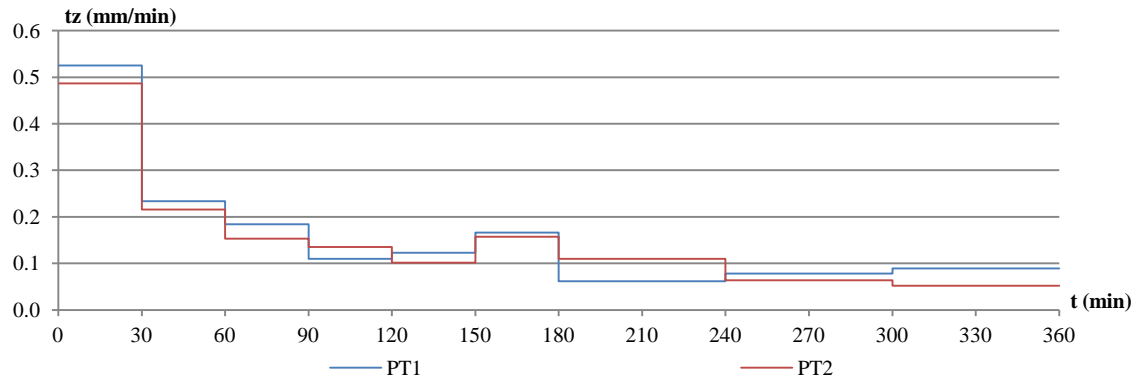


Figura 5.8 - Diferenças médias absolutas das cotas dos perfis ao longo do tempo de ensaio, para ambos os perfis analisados

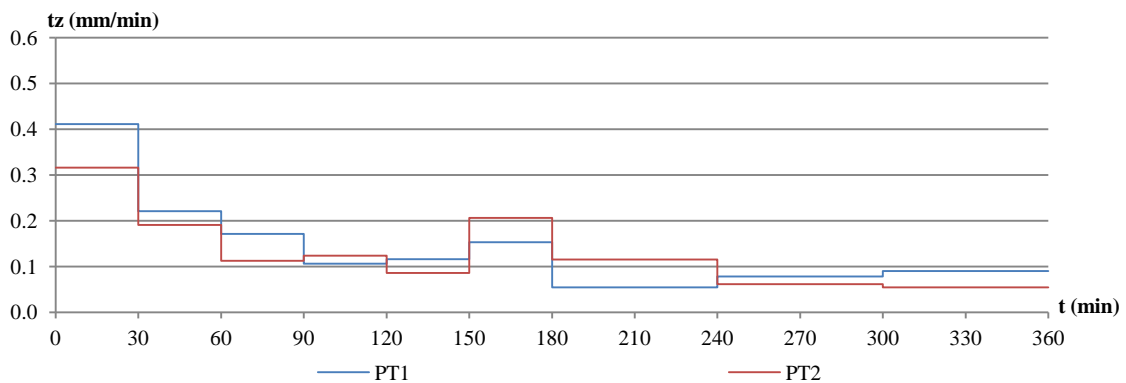


Figura 5.9 - Desvio padrão das diferenças médias absolutas (entre todos os pontos do perfil) ao longo do tempo de ensaio, para ambos os perfis analisados

Apesar do comportamento semelhante em termos de análise de movimentos no fundo, olhando para as diferenças médias, observa-se um comportamento oscilatório para ambos os perfis, identificando-se uma variação, cada vez com menor amplitude, das cotas para o perfil PT2, enquanto o perfil PT1 apresenta um comportamento oscilatório com uma maior amplitude, existindo alternadamente uma maior intensidade de fenómenos de acreção e sucessivamente de erosão.

5.2.2. Perfil de equilíbrio

Para a definição do perfil de equilíbrio foi considerada a média das medições nos instantes $t=240\text{min}$ e $t=360\text{min}$, para cada perfil. A figura 5.10 representa o resultado para o PT1 e o PT2.

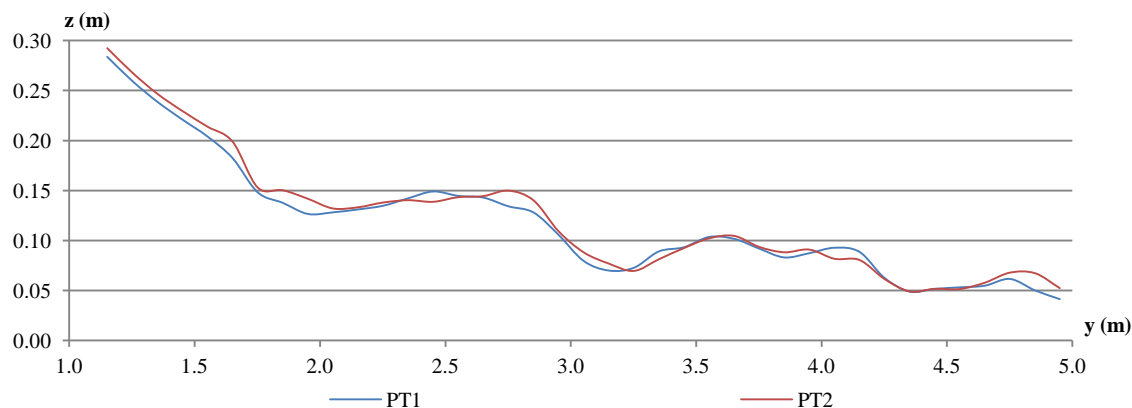


Figura 5.10 - Representação do perfil PT1 e PT2 em situação de equilíbrio

A maior diferença absoluta entre os perfis PT1 e PT2 é de 1.74cm e encontra-se a 4.85m do início do perfil. A generalidade dos pontos constituintes dos dois perfis apresenta diferenças de cotas relativas à própria altura do ponto em estudo, inferiores a 10% sendo assumidas como aceitáveis. Com base nesta análise assumiu-se que a média entre PT1 e PT2 em equilíbrio correspondia ao perfil de equilíbrio representativo da praia, para as condições de agitação marítima indicadas.

Na figura 5.11 são visíveis a presença de 3 bermas submersas, e as diferenças entre o perfil de equilíbrio de Dean (perfil inicial) e o obtido para as condições de agitação marítima definidas, pois o perfil de Dean não assume a existência de bermas.

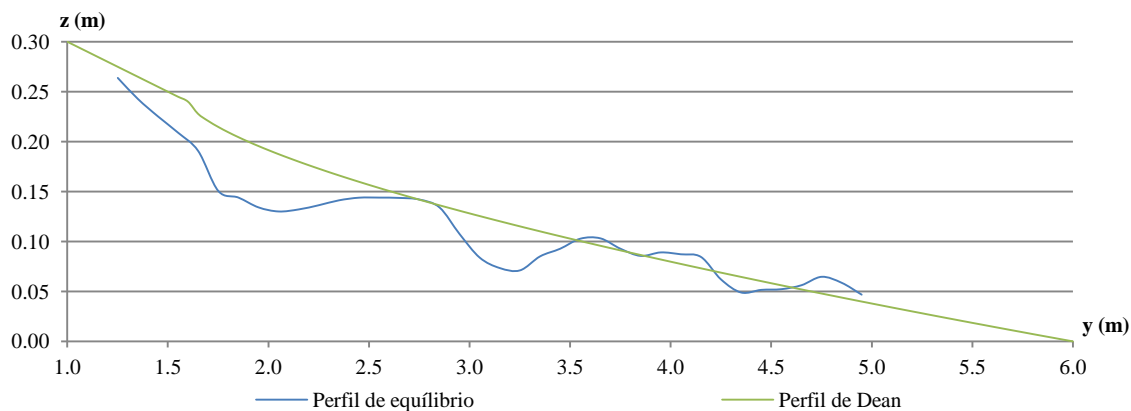


Figura 5.11 - Comparação entre o perfil de equilíbrio obtido no final do ensaio e o perfil de Dean

A diferença máxima de cotas, registada entre o perfil de Dean e o perfil obtido no ensaio foi de 6.41cm. O valor médio das diferenças entre o perfil Dean e o perfil final foi de 1.70cm (26.46% da diferença máxima absoluta registada), concluindo-se que o perfil inicial possuía maiores cotas. Este facto poderá estar relacionado com a incapacidade de compactar a areia corretamente, pelo que a praia poderá ter sofrido ligeiros assentamentos com a ação da agitação ou pela perda de sedimentos durante o ensaio (ou uma combinação de ambos).

Fazendo uma translação horizontal do perfil de Dean, definido inicialmente, de modo a que o primeiro ponto do perfil (para $y=0m$) coincida na interceção do perfil de equilíbrio com o nível da superfície de água, para a análise da validade da aproximação do perfil de Dean ao perfil de equilíbrio, obtém-se a figura 5.12. Para além da comparação do perfil do ensaio com o perfil de Dean, foi determinada a melhor aproximação de uma curva do tipo da expressão 5.1, aos pontos que constituem o resultado do ensaio (curva identificada a vermelho como "Curva de aproximação" na figura 5.12).

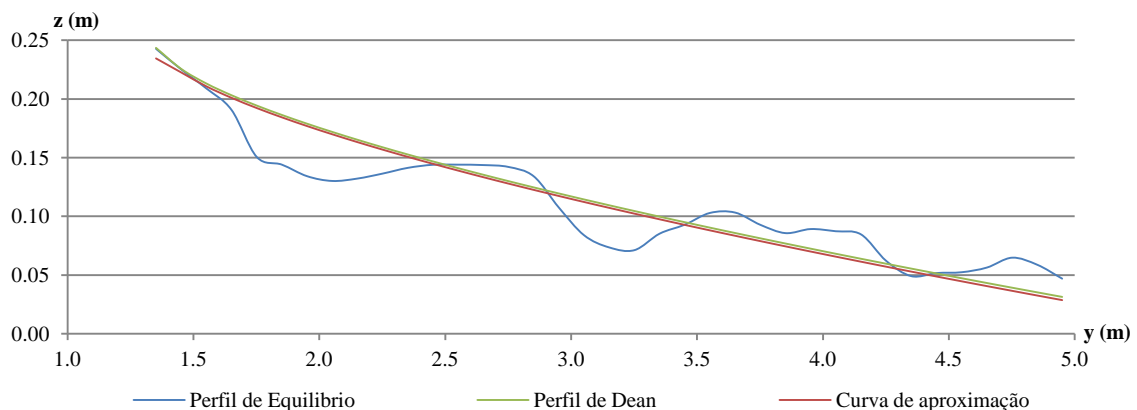


Figura 5.12 - Formas do perfil de equilíbrio obtido para o primeiro ensaio

A determinação da curva passou pela determinação do valor do parâmetro A , assumindo que se tratava de uma praia refletiva ($m=2/3$), tendo-se obtido o valor de 0.090 para o parâmetro em causa.

$$z=Ay^{2/3} \quad (5.1)$$

O valor de A obtido é muito próximo do valor adotado (0.089). Baseado apenas na proximidade de ambos os valores de A pode-se afirmar que o perfil de Dean, para as condições definidas no modelo físico ensaiado em laboratório, representa com elevada

precisão o perfil de equilíbrio obtido, capaz de ser definido analiticamente com simplicidade.

Olhando aos resultados da figura 5.12, para uma largura do perfil de 3.60m, correspondendo à zona submersa analisada pelo perfilador, registou-se uma diferença média entre o perfil de Dean e o perfil final de 4.70mm indicando que o perfil de Dean possui em média cotas superiores ao perfil de equilíbrio. As maiores diferenças registadas foram de 4.48cm e 2.54cm a uma distância do início do perfil de 4.51m e 1.35m, respetivamente.

5.3. Ensaio com esporão

O segundo ensaio pretende representar uma zona a barlar de uma estrutura transversal à linha de costa, sujeita a condições de agitação marítima constantes no tempo. A altura de onda considerada foi igual à do primeiro ensaio, mas a praia foi preparada com a linha de costa a descrever um ângulo de 10° com a orientação da agitação, para tentar retratar os fenómenos de acreção que se observam a barlar da estrutura (figura 5.13).

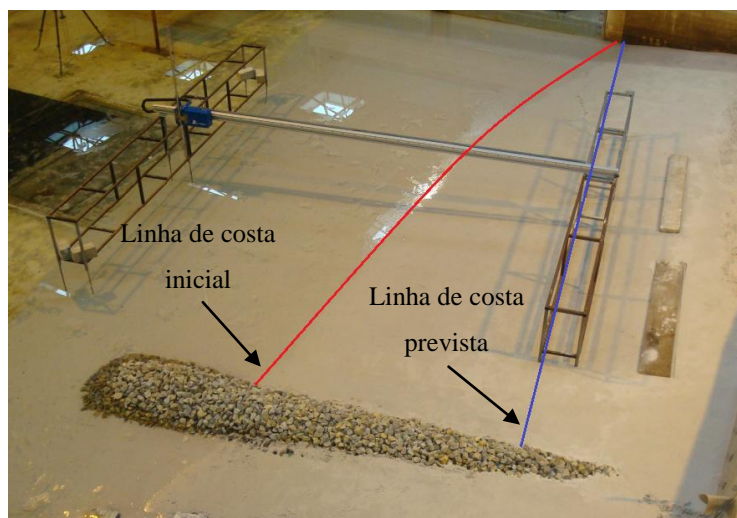


Figura 5.13 - Modelo físico da praia no início do segundo ensaio

Neste ensaio foram monitorizados cinco perfis transversais, o que se traduz numa utilização total dos suportes do perfilador. Os suportes foram colocados afastados um metro do eixo do esporão, sendo a sua posição também limitada pela presença da praia dissipativa. Novamente, utilizou-se a máxima extensão possível da viga do perfilador (cerca de 3.8m). Todas as dificuldades naturais de preparação da praia para o ensaio, bem como as limitações de material e mão de obra, originaram um perfil inicial diferente do

previsto, como se observa na figura 5.14 (neste ensaio as diferenças observadas são superiores às do ensaio anterior). Os perfis transversais no início do ensaio aparentaram uma forma bastante variável em toda a extensão da praia. Por este motivo a linha de costa inicial encontrou-se muito afastada da prevista, o que se reflete num aumento da extensão emersa do perfil e num ponto de partida do ensaio possivelmente próximo da capacidade de enchimento do esporão (figura 5.13).

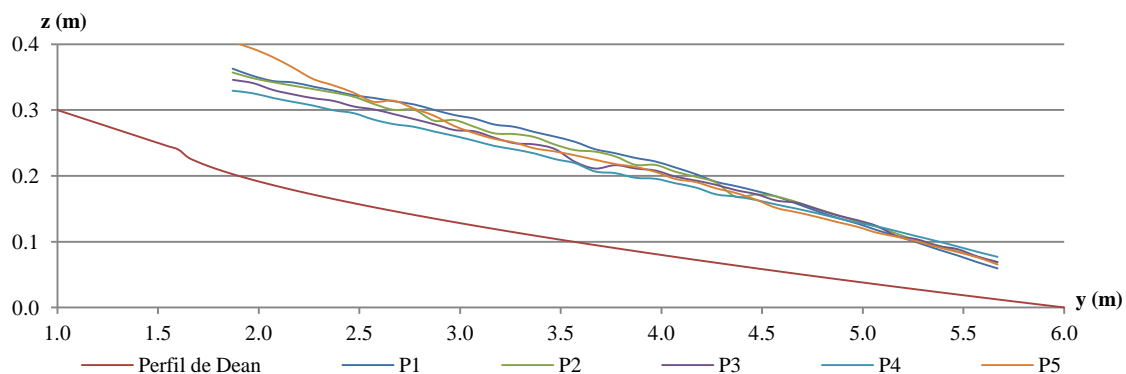


Figura 5.14 - Perfis transversais no início do segundo ensaio

Analisando as diferenças iniciais entre os perfis e o perfil de Dean previsto inicialmente, obtêm-se diferenças médias de 12.99cm, 12.59cm, 11.94cm, 11.15cm e 12.58cm, com valores máximos de diferenças de 16.79cm, 16.17cm, 14.91cm, 13.70cm e 20.08cm, para os perfis P1, P2, P3, P4 e P5, respetivamente. Tendo em conta que a altura de água foi de 24cm, observam-se diferenças médias que rondam os 51% da altura de água e diferenças máximas que rondam os 68% da altura de água, existindo diferenças muito significativas relativamente ao perfil inicialmente traçado. Por este motivo, o objetivo do ensaio consistiu na avaliação dos perfis transversais na configuração de equilíbrio, após o enchimento do esporão.

Nesta fase foram realizadas 2 medições das cotas para cada perfil transversal, em cada instante de tempo monitorizado. Para a caracterização da geometria dos perfis ao longo do tempo, foi feita a média das cotas das 2 medições, para o mesmo valor da coordenada horizontal. Tal como no primeiro ensaio, em alguns casos os valores medidos apresentavam incoerências devido às limitações do equipamento utilizado. Assim, procedeu-se por vezes à substituição parcial ou total do conjunto de dados de uma das medições.

Neste ensaio procedeu-se a uma alimentação de sedimentos na fronteira a barlar, permitindo uma deriva aproximadamente constante.

5.3.1. Evolução do perfil transversal

A figura 5.15 mostra o comportamento da morfologia dos perfis ao longo do tempo. Existe uma geometria final semelhante entre perfis, bem como uma evolução semelhante, identificando-se a formação de uma duna na zona emersa e de uma berma na zona submersa em todos os perfis. Regista-se um aumento das cotas (acrecção) dos perfis na zona emersa, numa extensão de aproximadamente 1m a partir da linha de costa, observando-se também uma diminuição das cotas (erosão) na zona submersa, numa extensão aproximada de 1m a partir da linha de costa (para os cinco perfis definidos). Observa-se que após meia hora de ensaio, existem mudanças mais significativas na geometria do perfil do que no resto do ensaio. Quanto mais próximo o perfil se encontra do esporão, menos alterações sofre ao longo do tempo, mantendo mais estável a sua geometria e atingindo mais rapidamente o equilíbrio. Entre todos os perfis, o perfil P5 é o que apresenta maiores diferenças das alturas para cada ponto entre os últimos dois instantes de análise ($t=240\text{min}$ e $t=360\text{min}$).

Tal como acontece no ensaio sem a presença do esporão, muitos dos pontos do perfil não apresentam uma diminuição das taxas de variação das cotas, podendo indicar que o equilíbrio ainda não foi atingido. No entanto, como se observa na figura 5.16, os perfis apresentam uma alternância entre taxas ao longo do tempo do ensaio, que pode estar relacionado com medições em pontos sobre a mesma forma do fundo (pouca variação), ou sobre cristas e cavas das formas de fundo (maior variação).

Para o ponto 2 da figura 5.16 identifica-se um comportamento final semelhante em todos os perfis exceto no perfil P4. Um pormenor que se observa em quase todos os gráficos da análise pontual é que os pontos constituintes do perfil P4, tendem a não estabilizar após as 6 horas de ensaio, apesar de nos instantes anteriores demonstrarem um comportamento contrário. Isto poderá ser causado por erros cometidos nas leituras do perfilador. No ponto 2, os perfis P1, P2, P3 e P5 apresentam taxas de variação das diferenças absolutas das cotas de 3.40mm/min, 4.40mm/min, 4.55mm/min e 2.55mm/min, respetivamente, enquanto o perfil P4 apresenta 17mm/min. Os valores finais não são os valores mínimos registados para cada perfil. Desprezando o perfil P4 neste ponto, os restantes perfis apresentam um comportamento convergente, na medida em que as taxas registadas no último intervalo de tempo se aproximam.

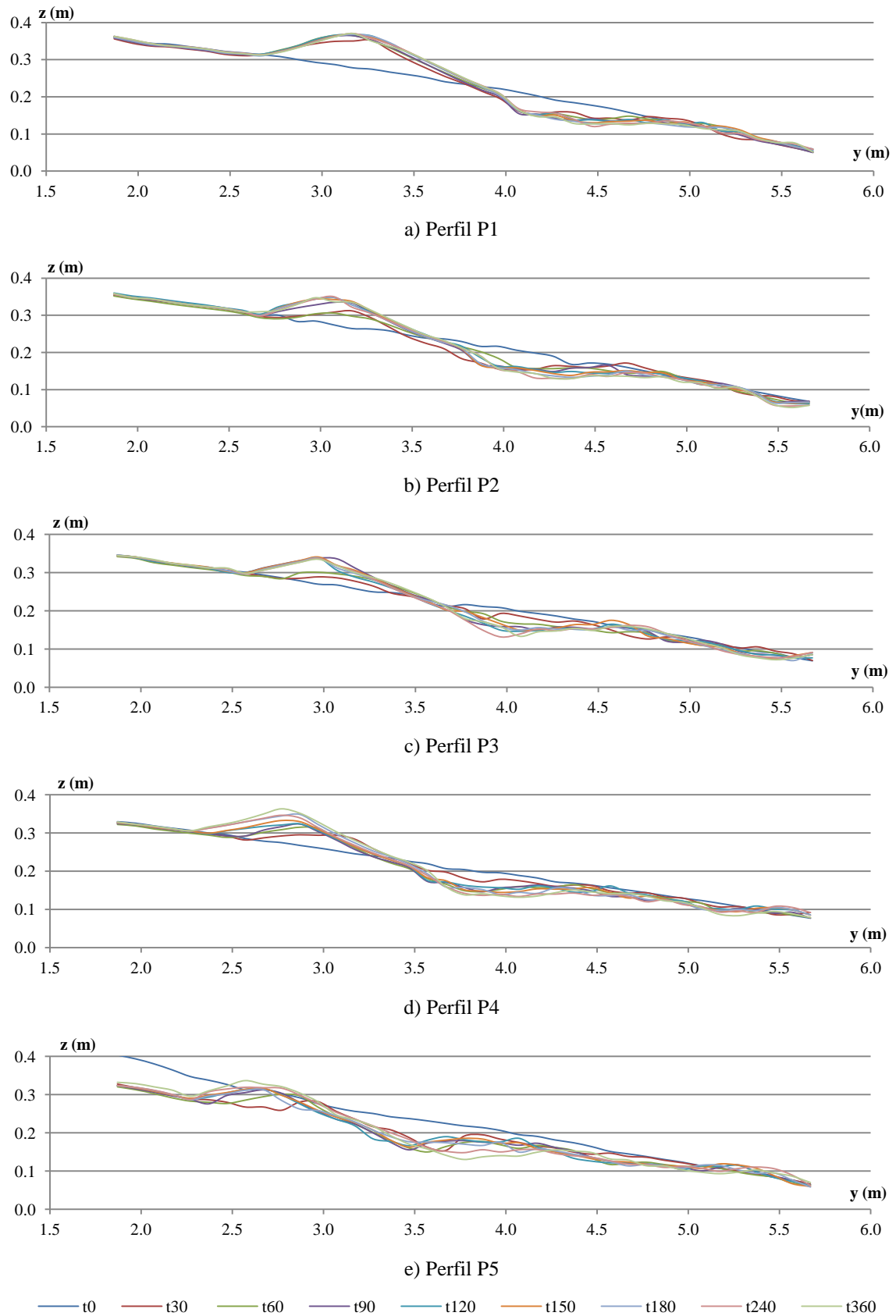


Figura 5.15 - Evolução temporal dos perfis transversais ao longo do segundo ensaio

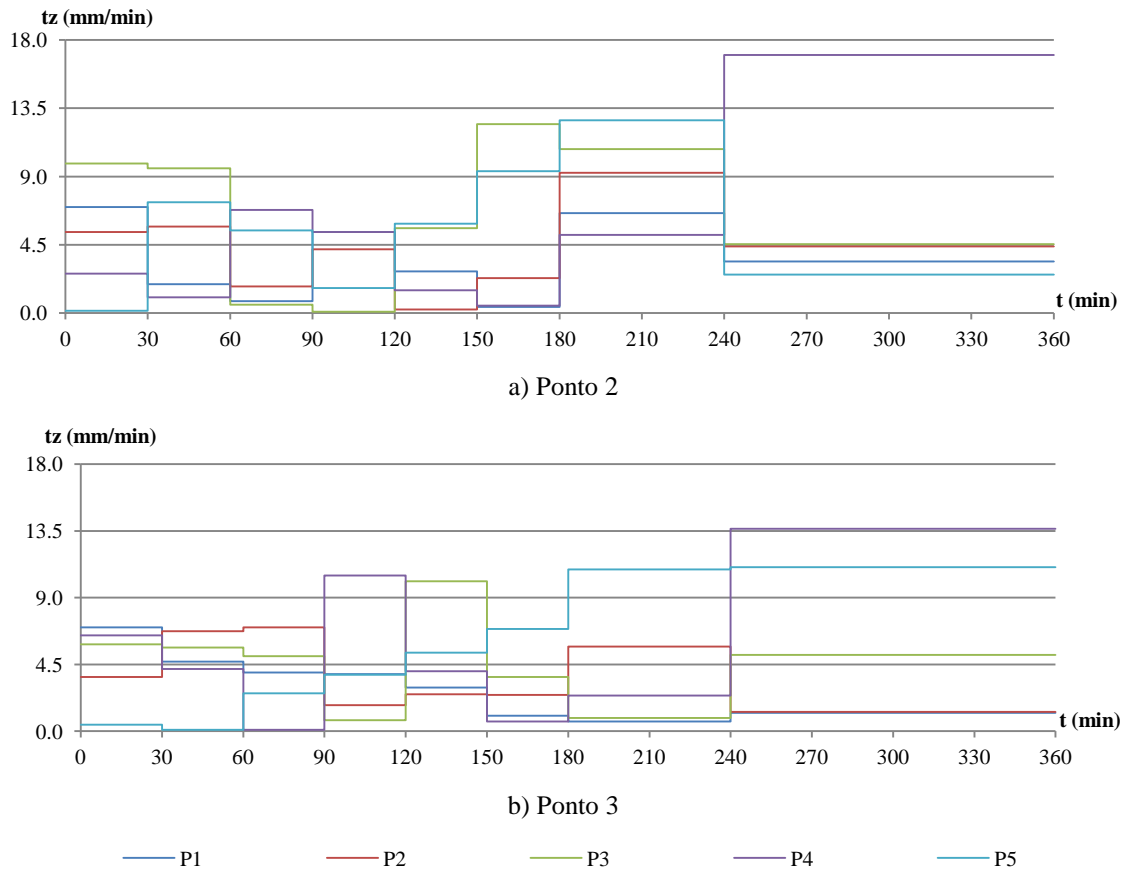


Figura 5.16 - Taxas médias (tz) das diferenças absolutas da altura perfil ao longo do ensaio, nos perfis P1 a P5

No ponto P3 regista-se um comportamento final divergente, onde as taxas registadas se afastam bastante, com exceção dos perfis P1 e P2, identificando-se os valores das taxas finais de 1.25mm/min, 1.30mm/min, 5.15mm/min, 13.65mm/min e 11.05mm/min respetivamente para os perfis P1 a P5. Olhando aos dois pontos analisados, a relação das taxas finais não se encontra relacionada diretamente com a distância dos perfis ao esporão. A figura 5.17 representa a evolução das diferenças médias absolutas entre as alturas de cada perfil ao longo da duração do ensaio. Observa-se que todos os perfis registaram o valor mais baixo das taxas de variação das diferenças absolutas de cotas entre os instantes $t=240\text{min}$ e $t=360\text{min}$. Os valores finais das taxas registadas foram de 0.027mm/min, 0.029mm/min, 0.039mm/min, 0.060mm/min e 0.071mm/min para os perfis P1 a P5 respetivamente. Em termos médios, existe uma clara diminuição e estabilização das diferenças absolutas ao longo do tempo, que juntamente com a diminuição e estabilização da dispersão dos valores (desvio padrão, registado na figura 5.18), ao longo do tempo, são indicativos de uma evolução para o equilíbrio.

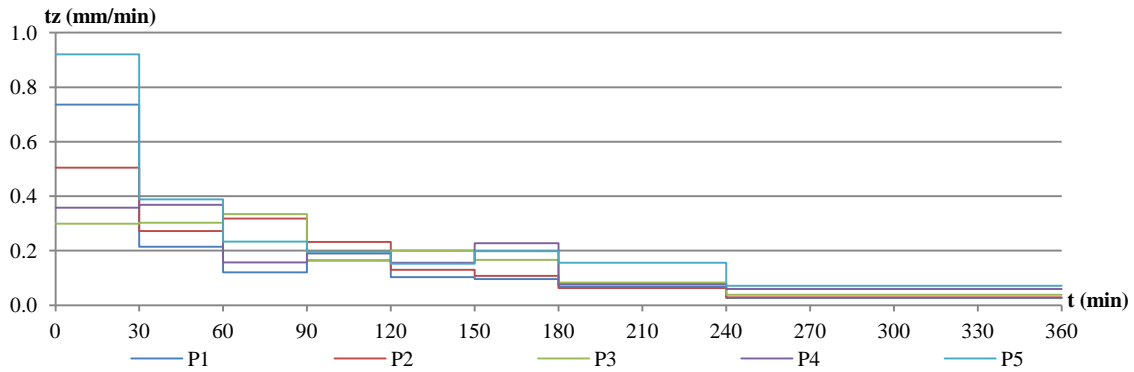


Figura 5.17 - Diferenças médias absolutas (entre todos os pontos do perfil) ao longo do tempo de ensaio, para ambos os perfis P1, P2, P3, P4 e P5

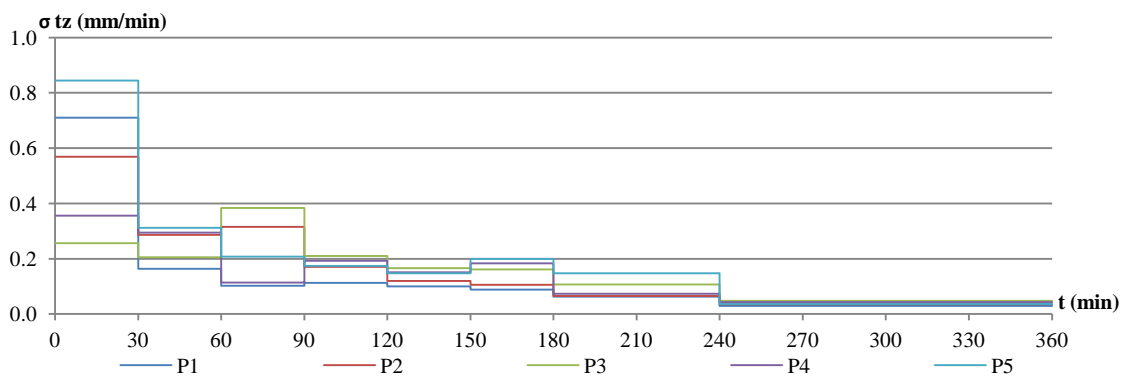


Figura 5.18 - Desvio padrão das diferenças médias absolutas (entre todos os pontos do perfil) ao longo do tempo de ensaio, para ambos os perfis P1, P2, P3, P4 e P5

5.3.2. Perfil de equilíbrio

Para a definição do perfil de equilíbrio de cada secção transversal da praia estudada foi feita a média dos resultados obtidos nas medições para os instantes $t=240\text{min}$ e $t=360\text{min}$ (tal como no ensaio anterior).

Na figura 5.19 verifica-se o recuo dos perfis à medida que se afastam do esporão. Para analisar a geometria dos perfis e tentar verificar se existe uma geometria comum para um perfil de equilíbrio, os 5 perfis em análise foram alinhados pelo ponto de interceção com o nível de água.

Olhando à figura 5.20 observa-se a presença de uma berma na zona emersa (dentro do limite de espraimento) cuja altura reduz à medida que os perfis se afastam do esporão, exceto no perfil P4. Durante o ensaio, por trás desta berma ocorreu circulação de água, que deu origem a uma ligeira escavação, formando-se uma espécie de canal. A não linearidade de altura da berma ao longo dos perfis poderá ser justificada por esta circulação de água,

que originou correntes de retorno que fluíam em direção aos batedores do tanque, cortando a duna, com posições variáveis ao longo do tempo.

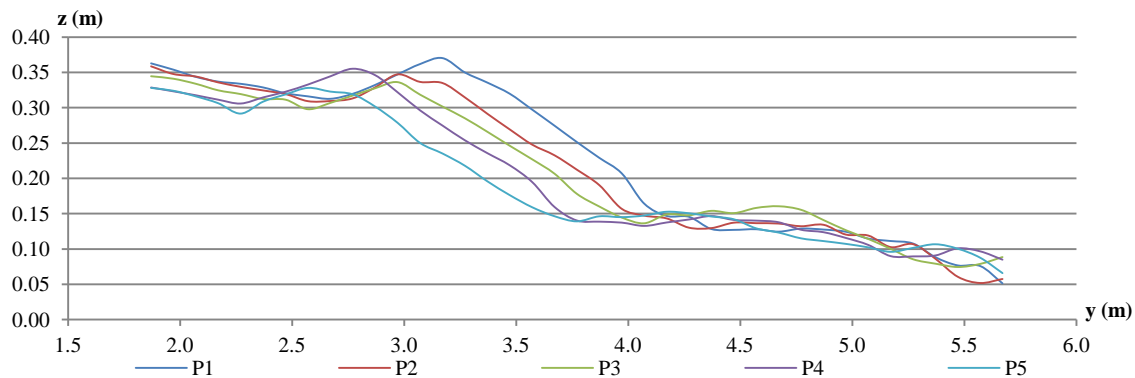


Figura 5.19 - Perfis transversais no final do segundo ensaio, em situação de equilíbrio

Os perfis transversais possuem quase a mesma inclinação do talude, possuindo também uma geometria semelhante, tendo em conta a presença de bermas emersas nos pontos mais altos e bermas submersas junto ao limite inferior do talude, bem como formas de fundo semelhantes.

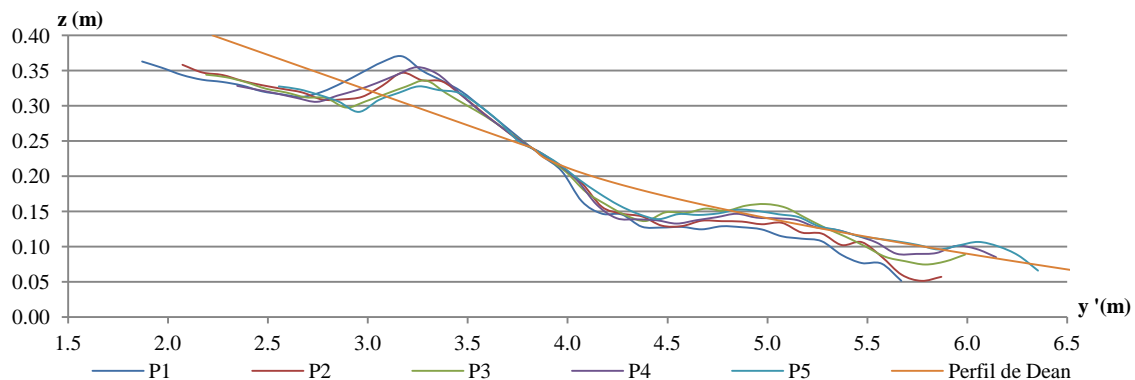


Figura 5.20 - Perfis transversais alinhados pela interseção com a superfície livre da água, comparados com o perfil de Dean

Para quantificar a aproximação do perfil de Dean aos perfis de equilíbrio obtidos foi feita uma comparação das cotas de cada perfil, com o perfil de Dean para a largura submersa de cada perfil, que aumenta à medida que os perfis se afastam do esporão, assumindo os valores de 1.8m, 2.0m, 2.1m, 2.3m e 2.5m (para os perfis P1 a P5, respetivamente). A maior diferença absoluta entre o perfil de equilíbrio e o perfil de Dean foi registada para o perfil P1, com um valor de 5.4cm. As diferenças médias registadas nos perfis P1 a P5 foram de 3.10cm, 2.25cm, 1.09cm, 1.10cm e 0.32cm, que, relativamente à altura de água adotada, rondam as percentagens de 12.92%, 9.37%, 4.54%, 4.57% e 1.35%,

respetivamente, mostrando que os perfis mais afastados do esporão têm uma geometria final mais próxima do perfil de Dean. Em termos médios, o perfil de Dean não se afasta muito do perfil obtido, a maioria dos perfis apresenta diferenças médias inferiores a 10% da altura de água adotada na extensão submersa dos perfis (analisada pelo perfilador). Pelas diferenças reduzidas de todos os perfis de equilíbrio ao perfil de Dean (elemento comum de comparação), conclui-se que os perfis são geometricamente semelhantes, fazendo sentido definir um perfil de equilíbrio com base nas médias das cotas dos perfis medidos, como representado a azul na figura 5.21 (Perfil de equilíbrio). Para a definição do perfil de equilíbrio foi apenas considerada a zona submersa para comparação com o perfil de Dean, uma vez que a expressão analítica de Dean (1977) define apenas a extensão submersa do perfil.

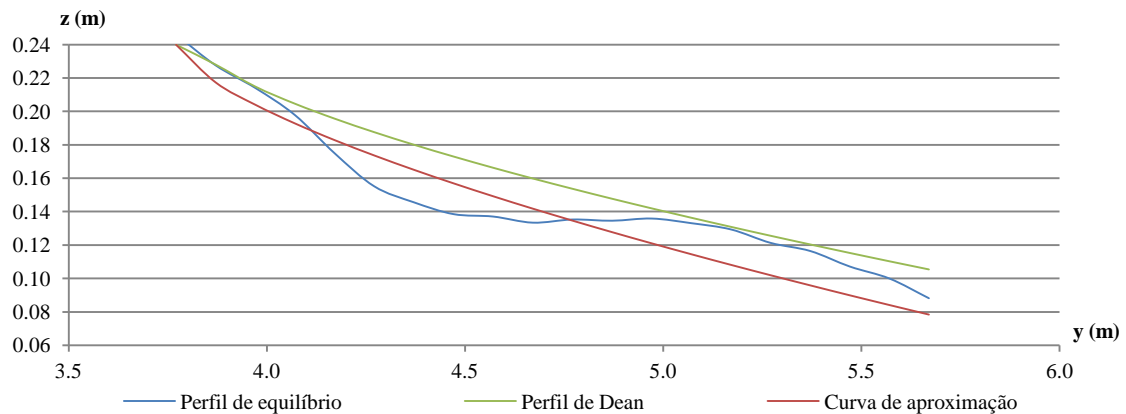


Figura 5.21 - Formas do perfil de equilíbrio obtido para o segundo ensaio

Olhando à figura 5.21 identificam-se diferenças significativas entre a expressão obtida para representar a melhor aproximação para caracterização do perfil transversal submerso, semelhante à expressão de Dean, do género da expressão 5.1 (para $m=2/3$), e a expressão de Dean determinada inicialmente. O valor de A obtido foi de 0.105 representando um aumento de 17.92% do valor inicialmente adotado (0.089). Conclui-se que para este ensaio, o valor de A definido inicialmente representa diferenças superiores a 10% do valor determinado, não sendo uma representação precisa do perfil de equilíbrio.

As diferenças médias entre os pontos constituintes do perfil e a expressão de Dean são de 2.21cm, enquanto as diferenças para a curva de aproximação assumiram um valor de 0.42cm. O perfil de Dean possui, maioritariamente, cotas superiores ao perfil médio obtido em laboratório, tendo-se registado diferenças entre 4.20cm e 0.70cm, enquanto para a

expressão obtida pela aproximação registam-se diferenças acima e abaixo do perfil com valores de 1.49cm e de 2.80cm, respetivamente.

5.3.3. Linha de costa e área dos perfis

Analisando a evolução da praia em planta (figura 5.22), as maiores diferenças de largura emersa e área dos perfis transversais, entre os valores iniciais e finais, registam-se nos perfis P1 e P5. Na zona mais próxima do esporão observa-se alguma acreção, apesar de no instante final ($t=360\text{min}$) a largura emersa ser ligeiramente menor do que nos instantes anteriores. No perfil P5 existe um recuo da linha de costa (erosão). É importante referir novamente que as diferenças da largura emersa, observadas para cada perfil, são reduzidas, pois a praia inicial partiu de uma situação próxima de equilíbrio.

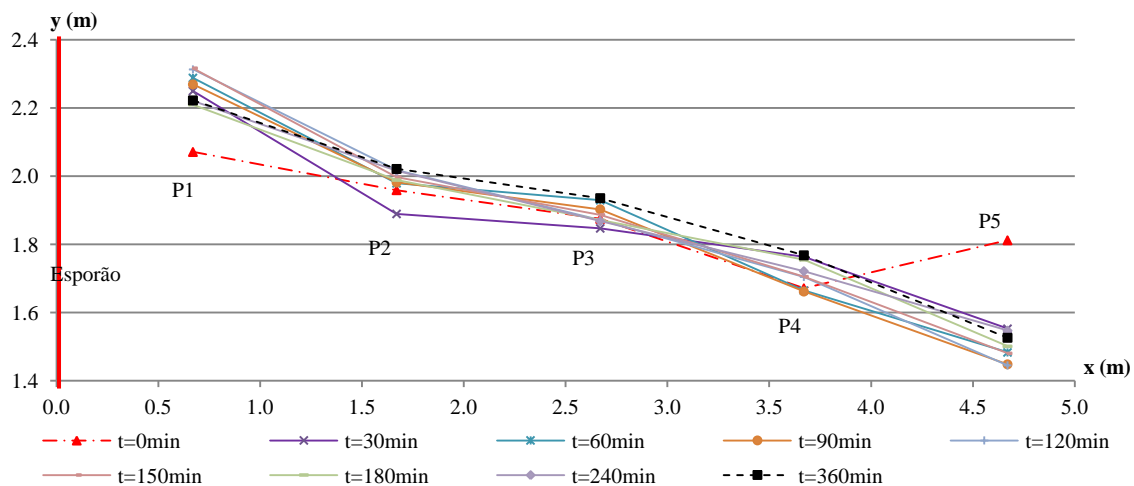


Figura 5.22 - Evolução da linha de costa em planta, na zona dos perfis P1 a P5

De modo a quantificar as variações observadas em cada perfil ao longo da extensão de praia definida, foi analisada a evolução das taxas de variação médias, da largura emersa dos perfis. Em geral, a variação média da largura emersa dos perfis tende para zero ao longo do tempo do ensaio, alternando o comportamento entre acreção e erosão. A única taxa negativa de movimento médio da linha de costa foi registada no perfil P5, com um valor de 1.243mm/min, sendo representativa da dominância de fenómenos de erosão. No entanto, entre os instantes $t=120\text{min}$ e $t=240\text{min}$, registaram-se taxas positivas (acreção) nesse mesmo perfil, com um valor médio de 0.876mm/min. A menor taxa de movimento médio foi registada no perfil P3 (0.118mm/min), tendo sido este perfil o que menos alterou a posição da linha de costa ao longo do ensaio. O perfil P1 foi o que registou a maior taxa de movimento médio de (acreção ao ritmo de 0.604mm/min).

Analisando a evolução global do perfil e não apenas a largura da zona emersa, observa-se uma estabilização da área total em todos os perfis, ao longo do tempo (figura 5.23). A dimensão dos perfis reduz com a distância ao esporão. O perfil cuja geometria se encontrava mais distante do equilíbrio era o perfil P5, mas durante os primeiros 30 minutos de ensaio aproximou-se rapidamente do equilíbrio. Os perfis P1 a P5 apresentaram uma variação total de área de 185.66cm^2 , 149.81cm^2 , 34.79cm^2 , 1.70cm^2 e 1062.20cm^2 , respetivamente. Assumindo que ao fim das 6 horas de ensaio se alcançou o equilíbrio só perfil P1 aumentou a sua dimensão, e os perfis P2 a P5 partiram com uma dimensão superior à de equilíbrio, tendo perdido sedimentos.

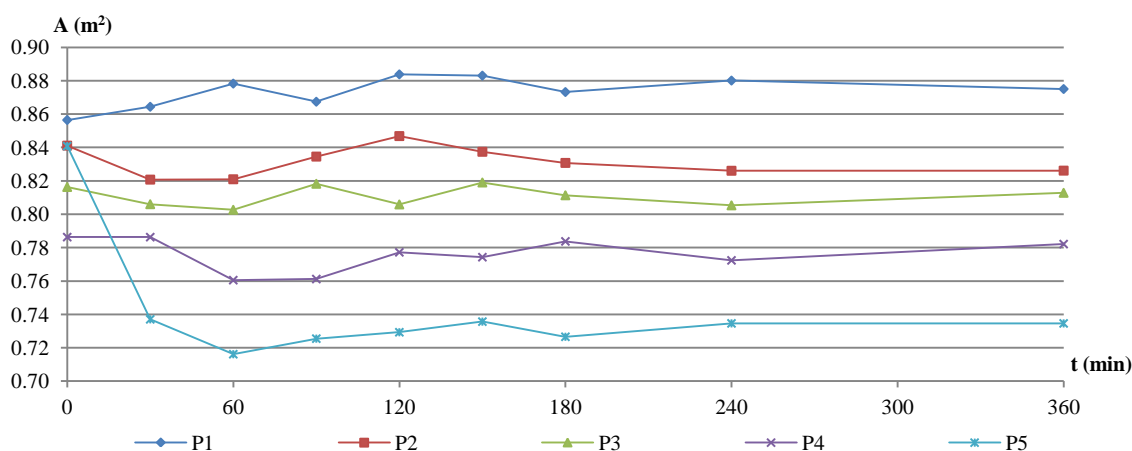


Figura 5.23 - Área dos perfis transversais ao longo do ensaio

5.4. Observações

Nesta secção são apresentados algumas observações relacionadas com o desenvolvimento dos ensaios e que podem contribuir para a explicação de incertezas nos resultados obtidos. Após o enchimento do tanque, antes de ser iniciado o ensaio, e entre longas pausas nos intervalos de análise dos ensaios, existiu a necessidade de se proceder à limpeza das sondas, para correta interpretação dos valores de altura de onda e período registados pelas mesmas. Este facto e a movimentação do perfilador entre as posições definidas para os perfis P1 a P5 obrigou à deslocação de alguém dentro do tanque, provocando oscilações na superfície da água e causando alterações das cotas dos perfis.

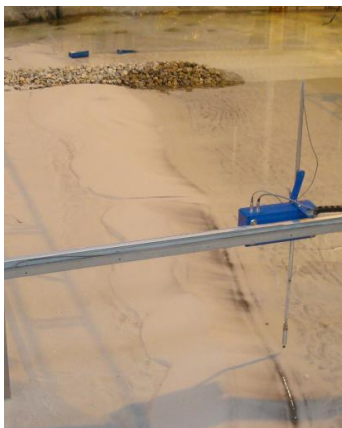
Devido à incapacidade de correta compactação da areia junto ao esporão (cenário 2) e devido à percolação de água pela praia, após o enchimento do tanque, formaram-se cavidades em torno de algumas zonas do esporão (como se observa na figura 5.24). A presença das cavidades intensificou com o decorrer dos ensaios, devido à ação da

ondulação, aumentando o número e dimensão das zonas em volta do esporão onde ocorreu este fenómeno.



Figura 5.24 - Cavidades e assentamentos junto ao esporão

Como referido anteriormente, em ambos os cenários, registou-se como referido anteriormente, a presença de correntes de retorno (figura 5.25), que podem ter influenciado os valores das cotas obtidos na zona emersa dos perfis. No entanto, não foram detetadas quaisquer correntes de retorno a sotamar do esporão que levassem à projeção de sedimentos para *offshore*.



a) Marcas de circulação de água atrás da berma emersa

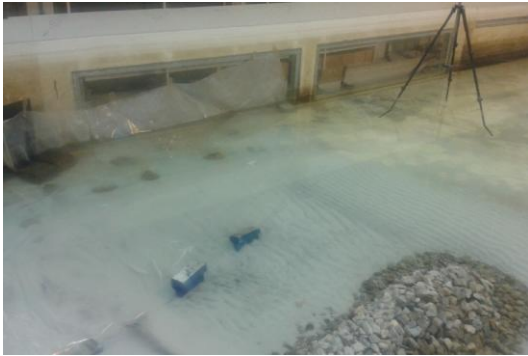


b) Formações na praia devido à presença de correntes de retorno

Figura 5.25 - Formas de fundo junto ao limite emerso da praia

No segundo cenário foi ainda construída uma calha a sotamar do esporão, de modo a tentar recolher os sedimentos transportados pelas correntes longitudinais (figura 5.26), com o objetivo de tentar quantificar a quantidade de sedimentos que passavam para sotamar do esporão. Efetivamente observou-se a acumulação de sedimentos sobre a calha construída, mas a quantificação dos volumes foi inviabilizada, pois os 2 plásticos que definiam a calha permitiam a passagem de sedimentos e soltavam-se durante os ensaios, independentemente

da sua fixação. Optou-se por desprezar a existência da calha devido à pouca precisão que teria para a determinação de taxas de transporte sedimentar.



a) Posição da calha em relação ao esporão



b) Pormenor da calha com sedimentos recolhidos

Figura 5.26 - Calha para recolher sedimentos a sotamar do esporão

Um pormenor que poderá ter efeito sobre a agitação gerada é o desalinhamento dos batedores, que poderá ter interferido na onda atuante sobre a praia, levando a valores ligeiramente diferentes dos previstos (figura 5.27). Também a reflexão da ondulação nas paredes do tanque, poderá ter influências sobre os resultados finais.



Figura 5.27 - Desalinhamento dos batedores

Capítulo 6

ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

6. Análise de resultados e discussão

Nesta secção será feita a comparação dos resultados obtidos para o modelo analítico, numérico e físico, comparando sempre que possível a geometria final dos perfis transversais e a evolução da largura de praia (ou da largura emersa dos perfis).

6.1. Comparação Pelnard-Considère e LTC: escala do protótipo

Para um tempo de cálculo de 350000 horas, a que correspondem cerca de 39.95 anos, observam-se diferenças na posição da linha de costa, para a formulação analítica de Pelnard-Considère (1956), para dois valores de k diferentes (figura 6.1). Como concluído anteriormente, o modelo analítico assume que a linha de costa com o avanço do tempo toma uma posição paralela à linha de costa inicial, afastada de uma distância igual ao comprimento do esporão. Logo, esta formulação assume a existência de equilíbrio apenas para um tempo de análise infinito o que faz com que para tempos menores de análise, dois valores diferentes do coeficiente de transporte proporcionem diferentes larguras de praia. Na formulação analítica as diferenças entre a posição da linha de costa em instantes consecutivos tendem sempre a diminuir ao longo do tempo. A rapidez com que se verifica o aumento da largura emersa dos perfis à medida que esta se aproxima do valor do comprimento da estrutura transversal também diminui com o tempo.

As diferenças geométricas observadas na figura 6.1, poderão ser explicadas devido ao facto da formulação de Pelnard-Considère (1956) assumir que as curvas de nível dos fundos são paralelas e que a geometria dos perfis transversais se mantém constante ao longo do tempo, apenas movendo-se na direção transversal, implicando que os gradientes do transporte sedimentar se encontram uniformemente distribuídos ao longo do perfil ativo (Gravens *et al.*, 1991).

O facto do LTC calcular o efeito de cada onda sobre a batimetria do perfil ativo, distribuindo os sedimentos uniformemente sobre essa extensão, alterando a geometria do perfil entre cada impacto das ondas, alterando as condições de refração, reflexão e empolamento da onda, tem um grande impacto sobre as diferenças registadas (Coelho *et al.*, 2013). No LTC, o equilíbrio na posição da linha de costa, já atingido ao fim de 39.95 anos de simulação, é independente do valor de k (figura 6.1).

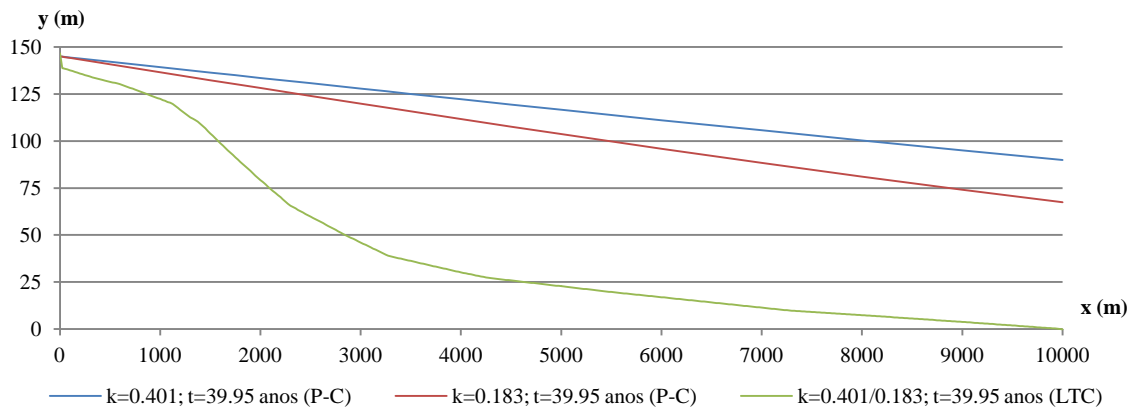


Figura 6.1 - Posição da linha de costa obtida pela formulação analítica de Pelnard-Considère (1956) e pelo LTC, após 39.95 anos

As diferenças entre o LTC e a formulação analítica, para ambos os cenários de k , apresentam um comportamento semelhante (figura 6.2). À medida que se afasta para barlar, observa-se um aumento nas diferenças obtidas. A diferença máxima registada entre o LTC e o cenário do modelo analítico, para $k=0.401$, é de 94.33m (65.06% do comprimento do esporão) e encontra-se a 7225m do esporão. Já a diferença máxima registada entre o LTC e o modelo analítico, para $k=0.183$, é de 82.17m (56.67% do comprimento do esporão) e encontra-se a uma distância de 4275m do esporão. A partir do perfil onde se registam as diferenças máximas, estas tendem a diminuir lentamente à medida que os perfis se afastam do esporão. Conclui-se que quanto menor for o valor de k , menores serão as diferenças entre o LTC e Pelnard-Considère (1956) para um tempo de cálculo de 350000 horas (39.95 anos), ao longo de toda a extensão de costa.

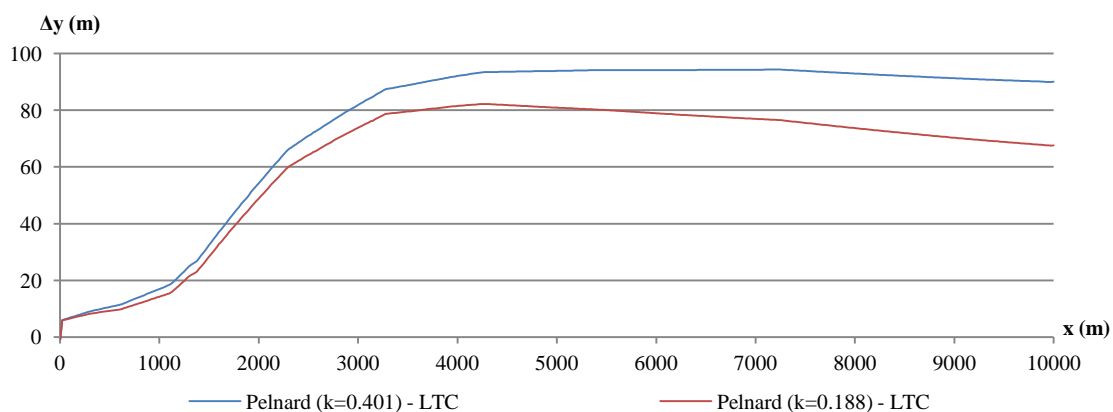


Figura 6.2 - Diferenças entre a formulação analítica e o LTC, à escala do protótipo, ao fim de 39.95 anos

Observando as figuras 6.3 e 6.4, conclui-se que para os perfis P1 a P5, a evolução inicial da largura ocorre mais rapidamente no LTC. No entanto, pela formulação analítica de

Pelnard-Considère registam-se maiores larguras para todos os perfis, após 39.95 anos de análise. Os perfis P6 a P9 possuem uma maior diferença entre os valores da formulação analítica e numérica. Para todos os perfis, quanto maior é o intervalo de tempo de análise, maior são as diferenças finais entre formulações, independentemente dos valores do coeficiente de transporte sedimentar. Após 39.95 anos de análise regista-se no LTC uma estabilização da evolução da largura em todos os perfis, para ambos os valores de k , enquanto, na formulação analítica, apenas os perfis P1 a P5 apresentam sinais de estabilização na evolução da largura emersa. Isto acontece, pois Pelnard-Considère (1956) só define equilíbrio quando a largura dos perfis, para toda a linha de costa, alcança o valor da extensão do esporão, o que só ocorre para um intervalo de tempo infinito. Comparando as figuras 6.3 e 6.4, o valor de k só interfere na rapidez com que determinado valor de largura emersa é alcançado.

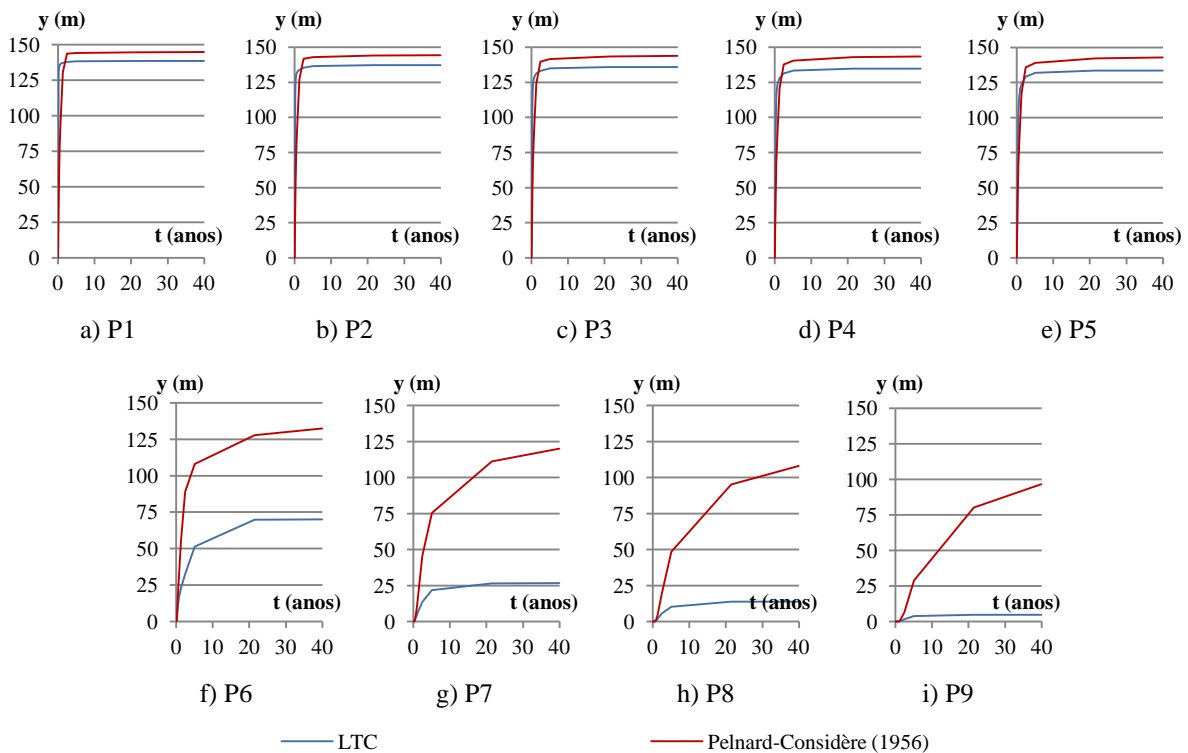


Figura 6.3 - Evolução da largura emersa dos perfis P1 a P9, no protótipo, para $k=0.401$, num intervalo de tempo de 40 anos

Segundo $k=0.401$, para os perfis P1 a P5, verificam-se maiores valores de largura emersa no LTC do que em Penard-Considère (1956), num intervalo de tempo de aproximadamente 1.30 anos. Para os perfis P6 a P9, a formulação analítica regista sempre uma maior largura emersa. Ao fim de 39.95 anos, as diferenças registadas entre formulações, para os perfis P1

a P9, assumem os valores de: 6.27m; 7.10m; 7.94m; 8.74m; 9.45m; 62.33m; 93.49m; 94.21m e 91.71m. Estas diferenças correspondem a valores relativos ao comprimento do esporão (formulação analítica) de: 4.32%; 4.90%; 5.48%; 6.03%; 6.51%; 42.99%; 64.48%; 64.97% e 62.25%, respetivamente.

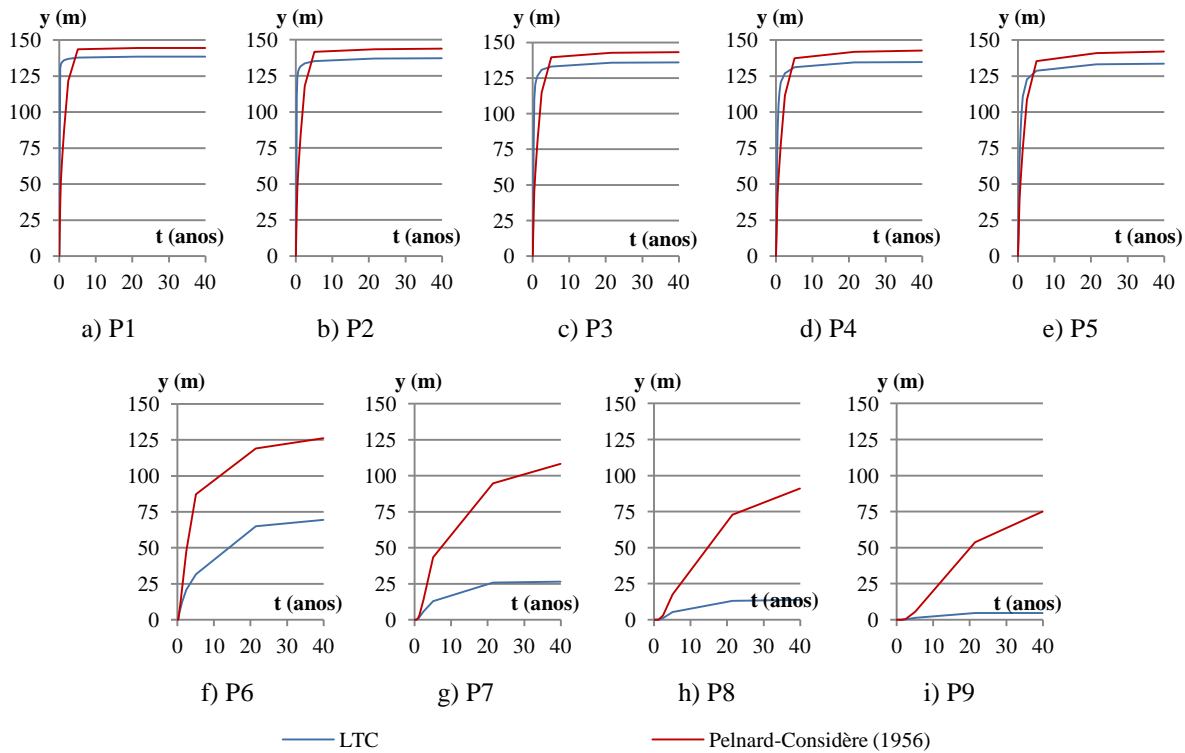


Figura 6.4 - Evolução da largura emersa dos perfis P1 a P9, no protótipo, para $k=0.183$, num intervalo de tempo de 40 anos

No caso do menor valor de k , as diferenças registadas entre formulações, para os perfis P1 a P9, assumem os valores de: 6.14m; 6.76m; 7.38m; 7.99m; 8.49m; 56.68m; 81.64m; 77.20m e 70.40m, respetivamente. Estas diferenças correspondem a valores relativos ao comprimento do esporão (formulação analítica) de: 4.23%; 4.66%; 5.09%; 5.51%; 5.86%; 39.09%; 56.30%; 53.24%; e 45.55%, respetivamente.

Regista-se uma diminuição das diferenças totais entre a formulação analítica e numérica para um menor valor de k , e uma ligeira diminuição das diferenças relativas. Isto acontece porque o menor valor de k atrasa a evolução da linha de costa em Pelnard-Considère (1956), originando uma menor largura de praia, mais próxima de equilíbrio no LTC.

6.2. Comparação Pelnard-Considère, LTC e Laboratório: escala do modelo

Como a posição inicial do modelo estudado em laboratório partiu de uma configuração inicial de linha de costa diferente da esperada (situação não controlada), não é possível comparar a evolução da posição da linha de costa e a geometria dos perfis transversais, entre a formulação analítica, numérica e o modelo físico. Por isso, optou-se por comparar a evolução da largura emersa dos perfis entre o modelo numérico e o modelo físico, comparar a posição final da linha de costa (equilíbrio), entre o modelo físico, o modelo numérico e o modelo analítico, e comparar a configuração dos perfis transversais entre o modelo físico e o modelo numérico.

6.2.1. Configuração em planta

Para uma situação de equilíbrio no LTC, correspondente a um tempo de cálculo de 25000 horas (cerca de 2.854 anos), obtém-se uma linha de costa quase idêntica para os dois valores de k , enquanto na formulação analítica de Pelnard-Considère (1956), encontram-se diferenças da largura de praia muito significativas na extensão analisada, como se observa na figura 6.5. No laboratório, a extensão de praia analisada só permite desenvolver considerações para os perfis P1 a P5, apresentados mais à frente.

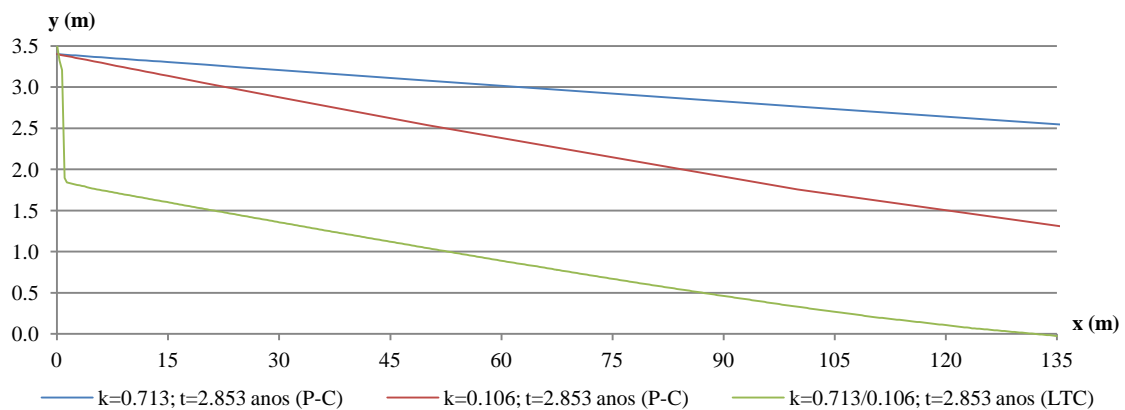


Figura 6.5 - Posição da linha de costa, obtida pela formulação analítica de Pelnard-Considère (1956), pelo LTC e em laboratório, de k após 25000 horas para os modelos e após o alcance do equilíbrio da praia

Tal como no protótipo, comparando a configuração final da linha de costa entre o LTC e o modelo analítico, para ambos os cenários, identifica-se um comportamento semelhante, tal como no protótipo (figura 6.6). A diferença máxima entre o LTC e o cenário do modelo analítico, para $k=0.713$, é de 3.16m (92.94% do comprimento do esporão) e encontra-se no

perfil transversal que dista de 38.50m do esporão. Já a diferença máxima registada entre o LTC e o modelo analítico, para $k=0.108$, é de 2.83m (83.24% do comprimento do esporão) e encontra-se a 31.40m do esporão. A partir do perfil onde se registam as diferenças máximas, existe uma diminuição das diferenças com o afastamento ao esporão. Novamente, conclui-se que quanto menor o k , menor serão as diferenças entre o modelo numérico e a formulação analítica, para uma situação de equilíbrio da linha de costa no LTC.

No equilíbrio, observa-se que as diferenças relativas, entre a formulação numérica e analítica são maiores no modelo do que no protótipo, existindo uma diferença relativa ao comprimento do esporão, de cada caso, de 27.88% para o maior valor de k e de 26.67% para o menor valor de k .

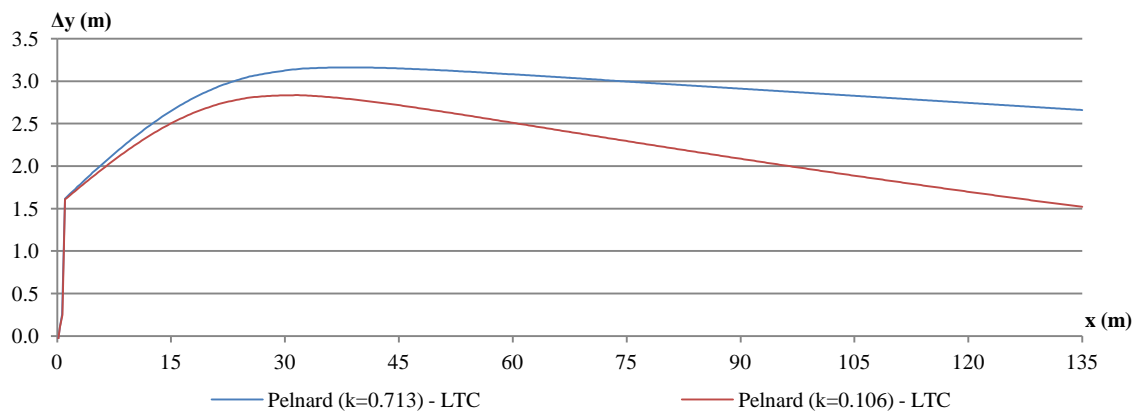


Figura 6.6 - Diferenças entre a formulação analítica e o LTC, à escala do modelo, ao fim de 2.853 anos

Para o maior valor do coeficiente de transporte sedimentar ($k=0.713$), o perfil P1 é o que apresenta um comportamento mais próximo entre as duas formulações. Tal como registado no protótipo, a formulação analítica possui valores de largura emersa final superiores aos da formulação analítica, sendo o perfil P1 o que apresenta a menor diferença entre os valores finais (figura 6.7). Do perfil P1 ao P5 a velocidade inicial da evolução da largura emersa é semelhante entre as formulações, mas, antes do tempo de enchimento, as larguras emersas dos perfis estabilizam para o LTC.

A diminuição do valor do k tem um maior impacto na formulação de Pelnard-Considère, do que no LTC (figura 6.8). Esta diminuição faz com que os perfis P1 a P5 possuam inicialmente uma maior largura emersa dos perfis. O menor valor de k origina menores diferenças relativas para os perfis P6 a P9. As diferenças relativas aumentam à medida que

os perfis se afastam no esporão, e à medida que o intervalo de tempo de análise aumenta, para ambos os valores de k , tal como no protótipo.

A estabilização da largura emersa ocorre mais rapidamente no LTC, para o maior valor de k . Na formulação analítica, apenas os perfis P1 a P5 apresentam uma maior proximidade à estabilização da largura emersa, tal como no protótipo.

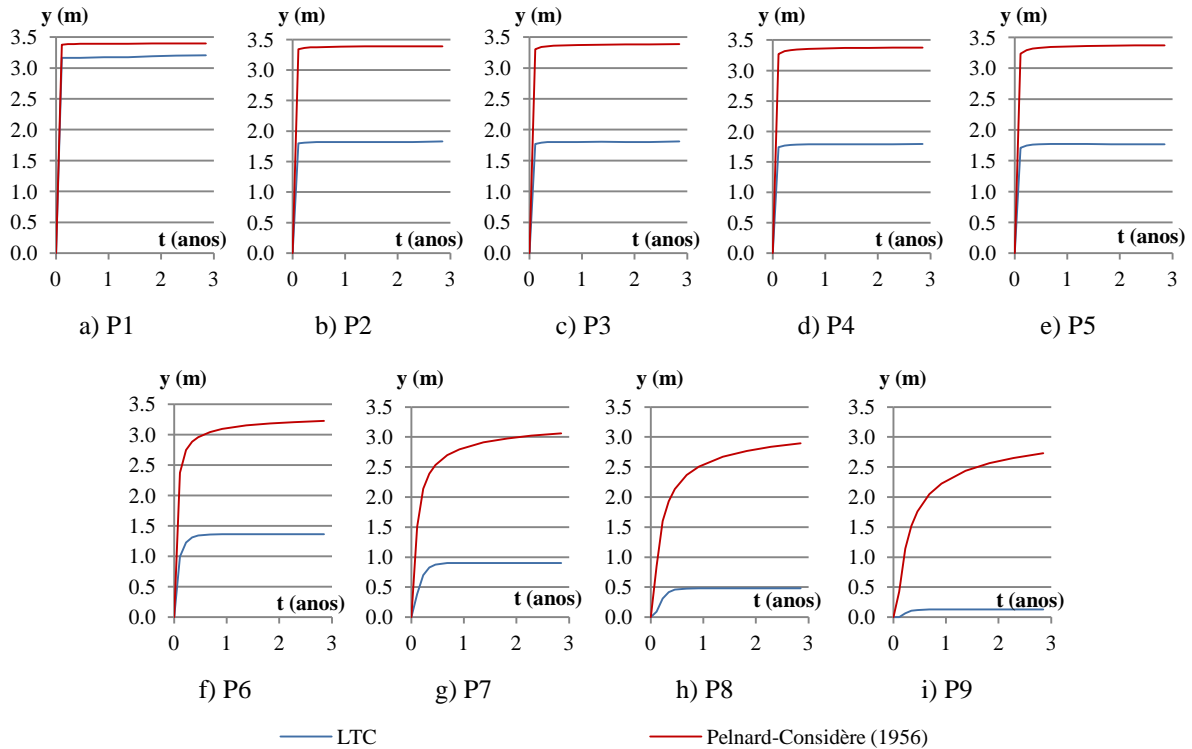


Figura 6.7 - Evolução da largura emersa dos perfis P1 a P9, no modelo, para $k=0.713$, num intervalo de tempo de 2.853 anos

Para o maior valor do coeficiente de transporte sedimentar, $k=0.713$, em nenhum dos perfis se regista uma maior largura de praia no LTC do que em Pelnard-Considère, em nenhum instante analisado. As diferenças entre formulações, para os perfis P1 a P9, assumem os valores de: 0.19m; 1.56m; 1.57m; 1.59m; 1.61m; 1.87m; 2.16m; 2.41m e 2.60m, respetivamente. Estas diferenças correspondem a valores relativos ao comprimento do esporão (formulação analítica) de: 5.59%; 45.88%; 46.18%; 46.76%; 47.35%; 55.00%; 63.53%; 70.88% e 76.47%, respetivamente.

Também para $k=0.108$, em nenhum dos perfis se regista uma maior largura de praia no LTC do que em Pelnard-Considère (1956), em nenhum instante analisado. As diferenças entre formulações, para os perfis P1 a P9, assumem os valores de: 0.23m; 1.56m; 1.56m; 1.56m; 1.56m; 1.61m; 1.64m; 1.64m e 1.60m, respetivamente, correspondendo a valores

relativos ao comprimento do esporão de: 6.76%; 45.88%; 45.88%; 45.88%; 45.88%; 47.35%; 48.24%; 48.24%; e 47.06%, respetivamente.

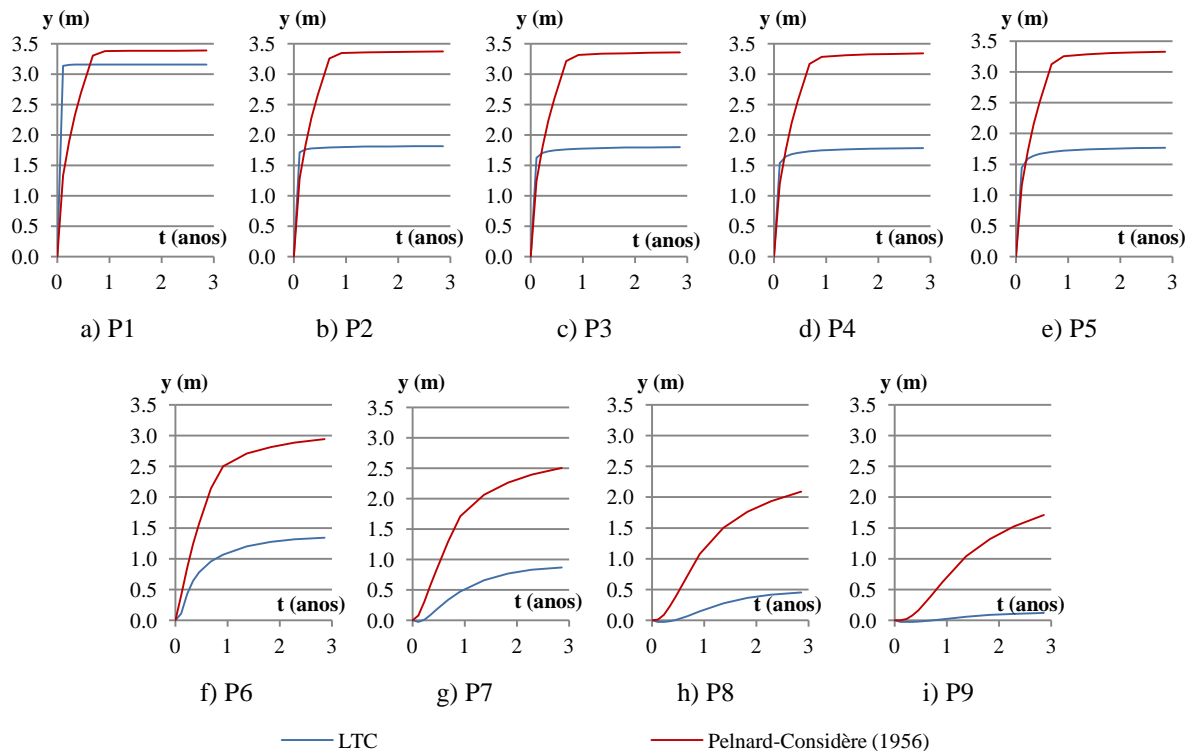


Figura 6.8 - Evolução da largura emersa dos perfis P1 a P9, no modelo, para $k=0.108$, num intervalo de tempo de 2.853 anos

Foi feita uma comparação das configurações finais da linha de costa obtidas no modelo analítico (com dois valores de k), no modelo numérico e em laboratório, com base na localização dos perfis monitorizados em laboratório (figura 6.9). O modelo numérico é o que se aproxima mais dos resultados obtidos em laboratório.

As diferenças geométricas observadas na figura 6.1, entre o modelo numérico e os resultados em laboratório, poderão estar relacionadas com as fronteiras do modelo numérico (Baptista *et al.*, 2014). Além disso, segundo Coelho (2005), Coelho *et al.* (2013) e Silva (2010), o transporte sedimentar não é modelado, mas sim, apenas calculado pelas expressões de CERC (1984) ou Kamphuis (1991), não se procedendo à correta distribuição transversal do caudal sólido longitudinal. A consideração de uma dimensão constante em toda a extensão da praia não é realista, visto que os sedimentos mais grosseiros tendem a localizar-se na zonas de maior libertação de energia, para mais facilmente a dissipar. Estas, poderão ser umas das causas para as diferenças registadas entre o modelo numérico e o modelo físico.

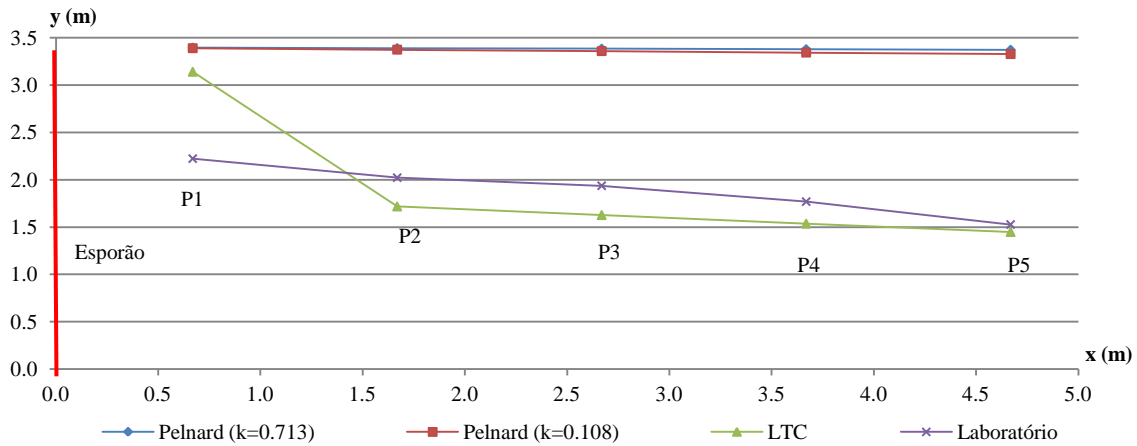


Figura 6.9 - Configuração da linha de costa, à escala do modelo (situação de equilíbrio)

Os 5 perfis analisados pelo modelo analítico de Pelnard-Considère (1956) possuem uma diferença absoluta da largura emersa superior a 1.00m (29.40% do comprimento do esporão), quando comparados com o laboratório. Esta diferença tende a aumentar à medida que os perfis se afastam do esporão. Nos resultados obtidos pelo LTC, observa-se que apenas o perfil P1 apresenta mais de 0.91m (26.80% do comprimento do esporão) do valor da largura emersa do mesmo perfil, obtido em laboratório. Os restantes perfis possuem uma diferença absoluta inferior 0.40m (11.80% do comprimento do esporão), possuindo uma menor largura emersa que os resultados em laboratório.

Do perfil P2 ao perfil P5 existe uma diminuição das diferenças absolutas entre os resultados do LTC e os obtidos em laboratório. O LTC é a formulação que mais se aproxima dos resultados obtidos em laboratório, com um valor médio das diferenças absolutas de 0.44m, enquanto o valor médio das diferenças absolutas entre a formulação de Pelnard-Considère e o laboratório é de 1.40m e 1.38m, para o valor máximo e mínimo de k , respetivamente.

6.2.2. Perfis transversais

A figura 6.10 representa os perfis transversais obtidos no LTC e em laboratório. Na largura analisada dos perfis, desde 0.30m a 4.00m (distância condicionada pela posição dos pontos no perfil obtido em laboratório e a distância entre os pontos da grelha do LTC) afastados da posição inicial da linha de costa inicial (no LTC) para um valor total da extensão transversal de 3.07m, registaram-se inclinações do talude do perfil inferiores no modelo numérico, sem a presença de bermas submersas e emersas. Apenas o perfil P1 apresenta

uma inclinação ligeiramente superior e uma maior largura emersa (0.91m) no modelo numérico. Como referido anteriormente, os restantes perfis possuem uma largura emersa semelhante entre o modelo numérico e o físico, com diferenças absolutas inferiores a 0.40m. No laboratório, as cotas submersas do perfil são mais baixas, obtendo-se valores de cotas mais altas na zona emersa.

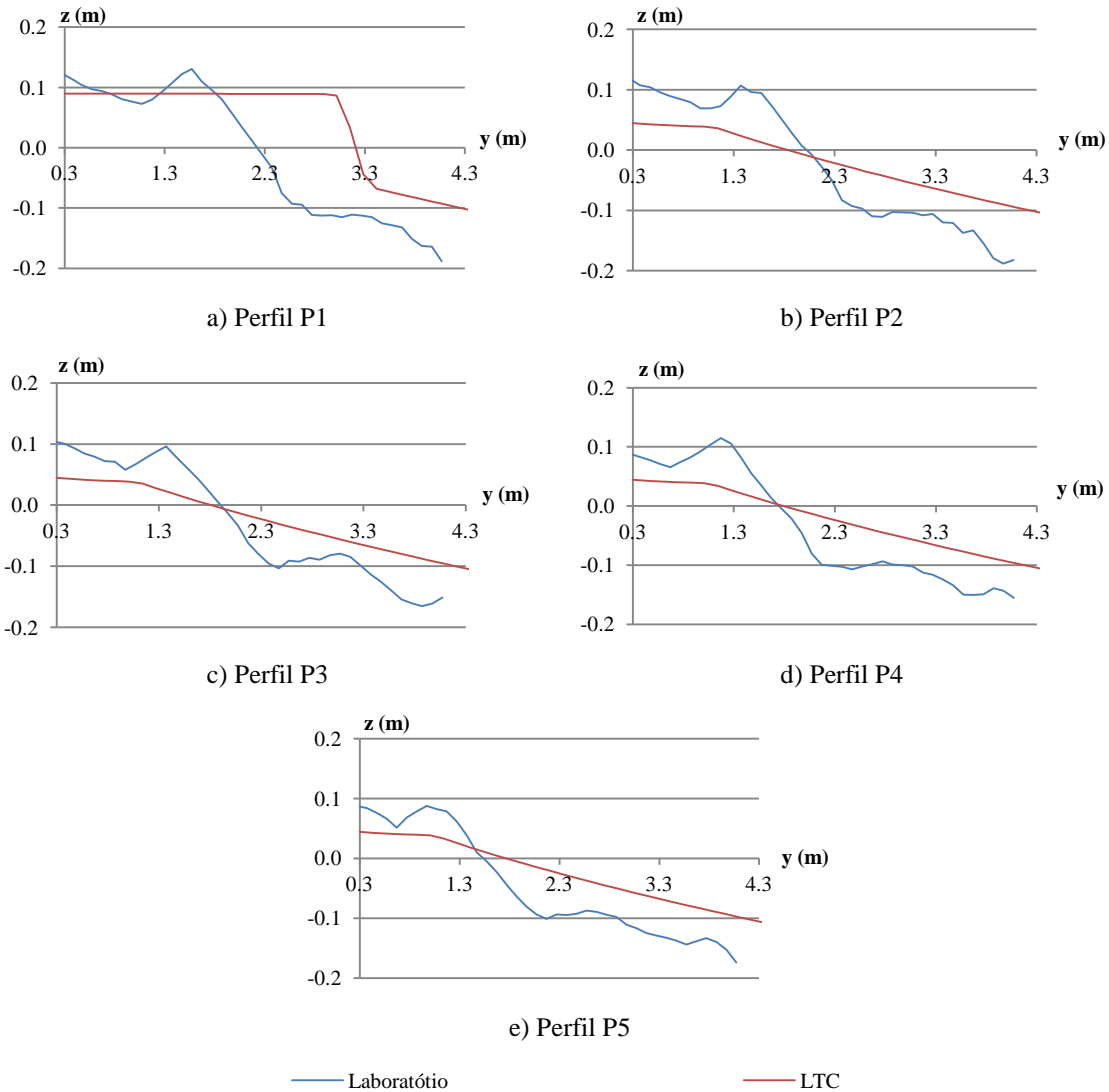


Figura 6.10 - Perfis transversais na situação de equilíbrio, à escala do modelo

As simulações realizadas com o LTC originam perfis com áreas superiores (para a extensão transversal analisada). O perfil P1 apresenta a maior diferença, cerca de 23dm^2 , com mais de área no LTC do que a obtida em laboratório (figura 6.11). Isto resulta numa diferença, relativa à área do perfil no modelo físico, de 26.10%. Os restantes perfis possuem uma menor diferença relativa, 3.55%, 5.36%, 9.34% e 15.20% para os perfis P2, P3, P4 e P5 respetivamente.

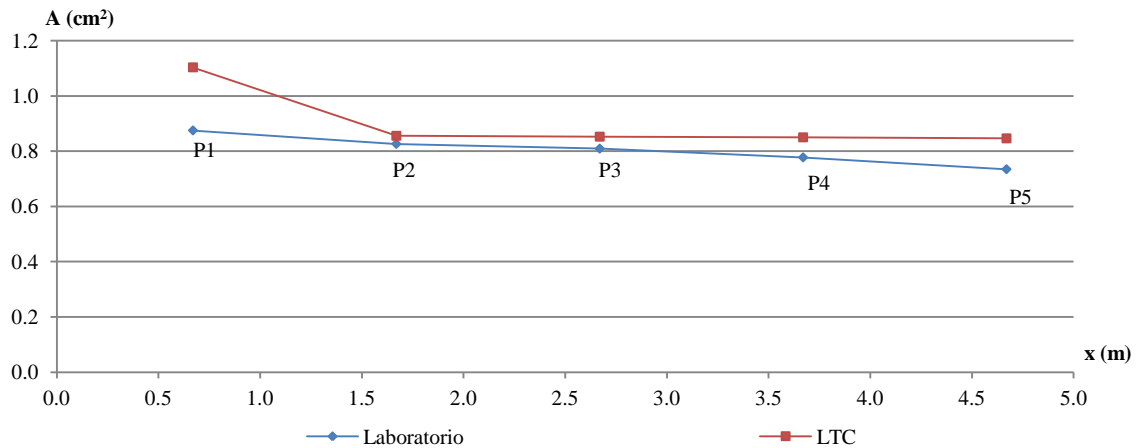


Figura 6.11 - Área total dos perfis em equilíbrio, no modelo numérico e no laboratório

6.3. Comparação modelo e protótipo, com a aplicação das relações de escalas

A comparação dos resultados de laboratório após a aplicação das escalas, com os modelos analítico e numérico do protótipo, foi feita com base nos perfis P1 a P5. Na análise, em planta, compararam-se os resultados entre todos os modelos. Na análise dos perfis transversais comparou-se apenas o modelo físico com a relação de escalas aplicado com os perfis obtidos a partir do LTC.

6.3.1. Configuração em planta

Aplicando as relações de escalas geométricas ao modelo físico ensaiado em laboratório e analisando a linha de costa com base na posição dos perfis P1 a P5, obtiveram-se as configurações de linha de costa que se mostram na figura 6.12.

Ambos os cenários do modelo analítico de Pelnard-Considère (1956), possuem diferenças mínimas na extensão de costa analisada, como observado anteriormente. Entre a formulação analítica de Pelnard-Considère (1956) e os resultados obtidos em laboratório, regista-se uma maior largura de praia para o laboratório, numa extensão entre 50m e 200m afastado do esporão. A máxima diferença absoluta registada foi de cerca de 30m no perfil P5, para ambos os dois valores de k adotados. Analisando as diferenças entre os resultados obtidos no LTC e em laboratório regista-se uma maior largura de praia para o modelo numa extensão compreendida entre 50m e cerca de 250m a barlar do esporão, obtendo-se uma diferença absoluta máxima de 26m para o perfil P1.

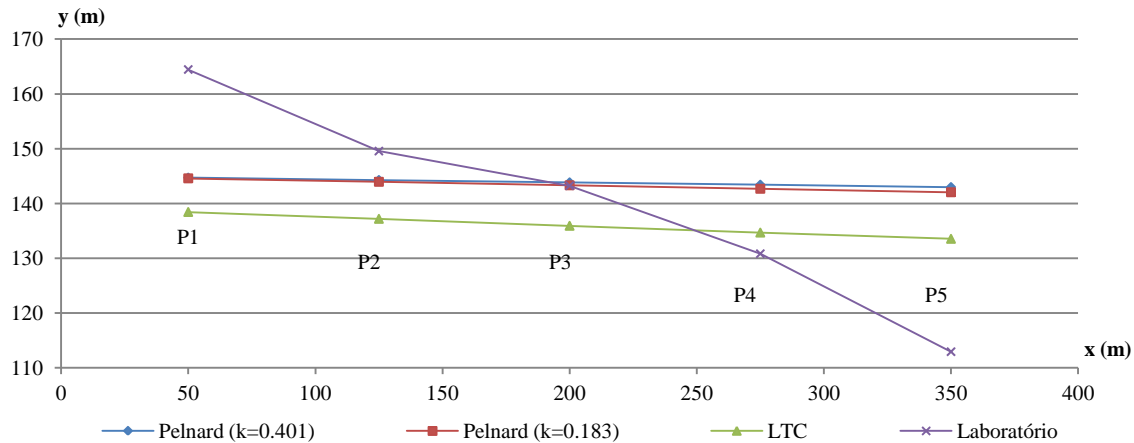


Figura 6.12 - Posição da linha de costa para todos cenários de protótipo, com base nos perfis P1 a P5

Com base nos valores médios das diferenças totais e absolutas na extensão analisada, observa-se que a formulação analítica possui uma maior aproximação média aos resultados laboratoriais, com uma diferença média total de 3.66m e 3.11m e com uma diferença média absoluta de 13.66m e 13.30m, para o maior e menor valor de k , respetivamente. A diferença média total entre o LTC e a aplicação das escalas no laboratório foi de -4.25m, com uma diferença absoluta média de 14.03m. No entanto, caso se tivesse analisado uma maior extensão longitudinal de praia, talvez o LTC descrevesse um comportamento mais semelhante ao obtido em laboratório, como se conclui das análises feitas anteriormente, dando origem a uma configuração final de linha de costa diferente.

6.3.2. Perfis transversais

Novamente, após a aplicação das relações de escala observa-se uma geometria distinta entre os perfis obtidos pelo modelo numérico e físico (figura 6.13). Numa extensão transversal de 230m, afastada 20m da posição da linha de costa inicial, observa-se que as inclinações entre o mesmo perfil para os dois modelos não é tão distinta como entre os perfis transversais sem a aplicação da relação de escalas. No entanto, não se identificam bermas emersas nem submersas no modelo numérico devido à utilização do parâmetro $NB=1$, e não $NB=2$.

Os perfis obtidos pela aplicação das escalas no modelo físico possuem áreas superiores, existindo uma diminuição da diferença de áreas à medida que os perfis se afastam do esporão (figura 5.14), existindo também uma ligeira sobreposição do talude do perfil transversal P4 numa extensão entre os 120m e os 170m afastada da linha de costa inicial.

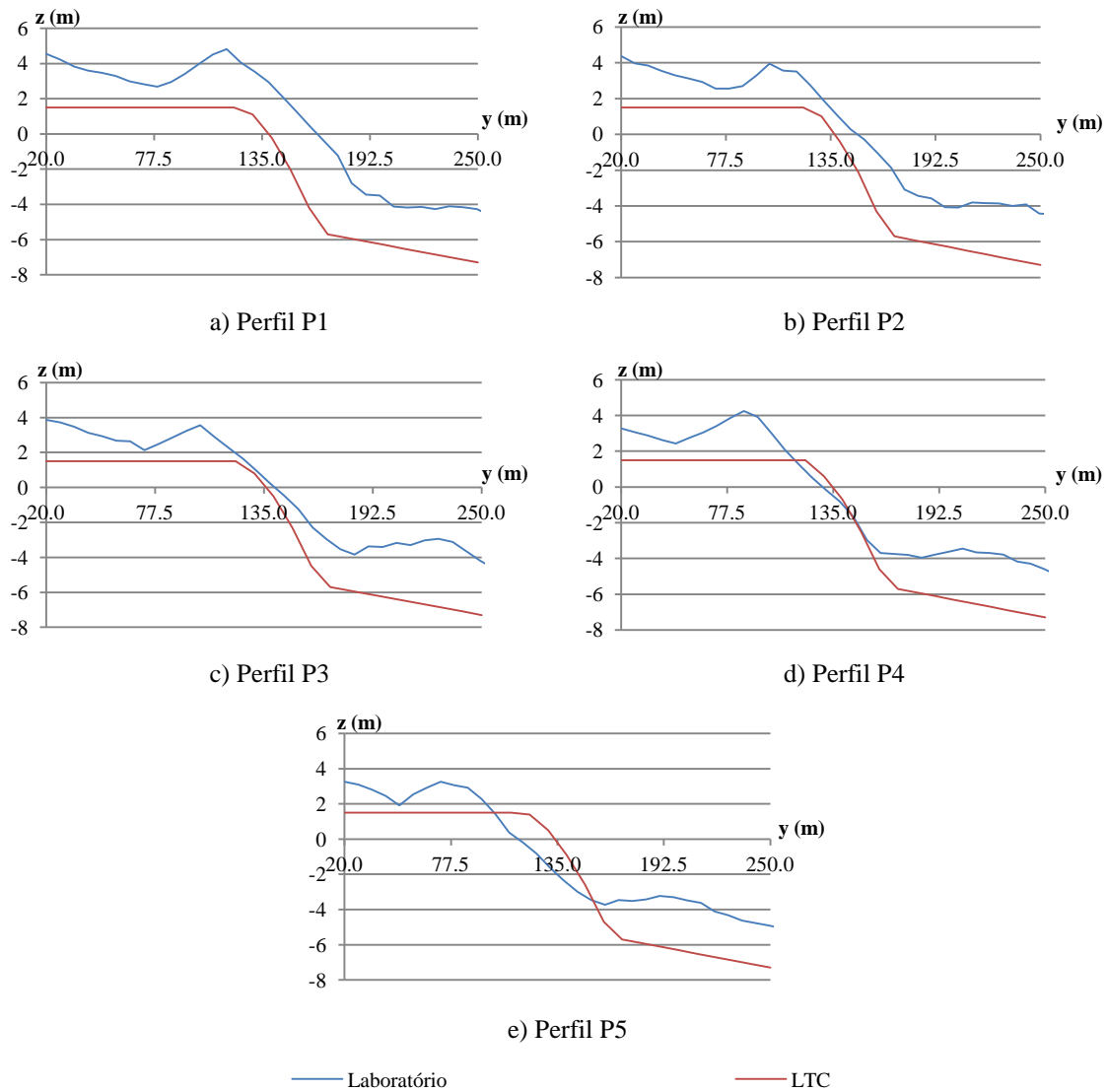


Figura 6.13 - Perfis transversais P1 a P5 da praia modelada com a presença do esporão, numa situação de equilíbrio (modelo com escalas aplicadas)

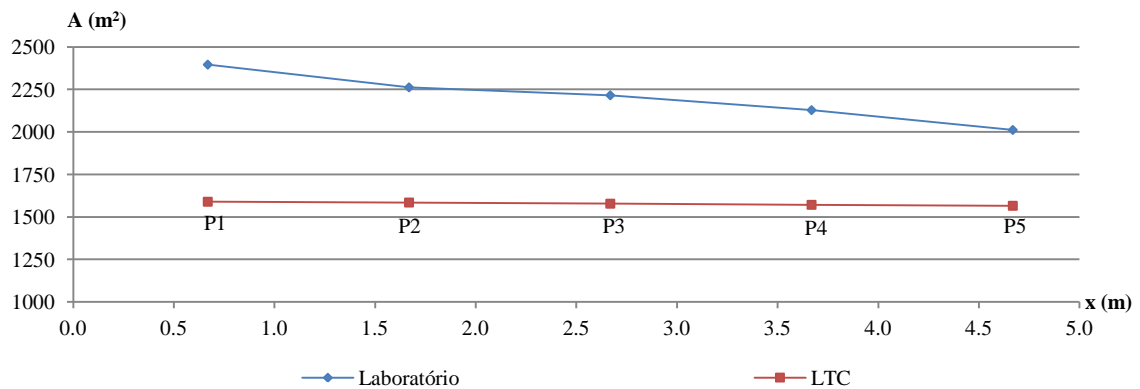


Figura 6.14 - Áreas totais, para uma extensão de 3.70m, de cada perfil no modelo numérico do protótipo e o modelo físico com a relação de escalas aplicada

O perfil P1 para o modelo numérico possui uma diferença de cerca de 806m^2 a menos de área, quando comparado com o modelo físico (figura 6.14). Isto resulta numa diferença relativa à área do perfil no modelo físico de -33.67%. Os restantes perfis possuem uma menor diferença relativa, -29.95%, -28.77%, -26.17% e -22.17% para os perfis P2, P3, P4 e P5, respetivamente.

O motivo, pelo qual áreas obtidas através da aplicação das escalas no modelo físico serem superiores às do protótipo, está relacionado com o facto do comprimento do esporão, quando multiplicado pela escala horizontal (valor adotado de 74), originar um esporão com um comprimento de 251.60m em vez dos 145m adotados. Gera-se, assim, uma praia com uma largura bastante superior à prevista.

Capítulo 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7. Considerações finais

Neste trabalho foi feita uma análise da influência de um esporão sobre a praia a barlar, mais precisamente, foi analisado o impacto da construção de um esporão, na configuração da linha de costa e na morfologia dos perfis transversais constituintes da praia em modelo analítico, numérico e físico. Realizou-se um controlo da evolução de alguns perfis transversais a várias distâncias do esporão, bem como da posição de linha de costa, com os objetivos de verificar a existência de uma configuração geométrica de equilíbrio para os perfis e linha de costa. Este estudo foi feito em laboratório à escala do modelo físico, bem como em modelo numérico e analítico onde se avaliaram os resultados à escala do protótipo e modelo, de modo a constatar se as formulações reproduzem corretamente o comportamento em laboratório.

7.1. Conclusões

A formulação analítica de Pelnard-Considère (1956) define o tempo de enchimento como sendo o tempo necessário até que a linha de costa que se desenvolve a barlar atinja a cabeça do esporão, assumindo que a partir deste instante o desenvolvimento da linha de costa ocorre mais lentamente, devido à maior transposição de sedimentos para sotamar. Oliveira (1997) propõe uma descrição gráfica, apenas exemplificativa do desenvolvimento do caudal sólido a sotamar do esporão, a partir do instante da sua construção, definindo tempo de enchimento como o intervalo de tempo necessário para que o caudal sólido, a sotamar, seja totalmente restabelecido após a interrupção inicial pela presença do esporão. A primeira dificuldade deste estudo relaciona-se assim com a definição do tempo de enchimento: tempo necessário para a linha de costa atingir a cabeça do esporão ou tempo até que a capacidade de retenção de sedimentos do esporão (se é que existe) seja totalmente alcançada, permitindo uma reposição total, ou quase total, do caudal sólido para sotamar.

Considerando a definição do tempo de enchimento proposta por Pelnard-Considère (1956) e olhando à posição de linha de costa final obtida em laboratório onde, para uma situação de equilíbrio, não é atingida a cabeça do esporão, verificam-se desde logo dificuldades de representação do comportamento do esporão. A incapacidade de comparação dos resultados obtidos em laboratório com a proposta de Oliveira (1997) deve-se ao facto da

praia inicial ter partido de uma situação já próxima do equilíbrio, bem como, à incapacidade de contabilizar os sedimentos na calha construída a sotamar do esporão.

A geometria da linha de costa obtida no modelo analítico é bastante diferente da linha de costa obtida no LTC. Pelnard-Considère (1956) define equilíbrio para um instante de tempo infinito, onde toda a linha de costa atinge uma posição paralela à inicial, afastada desta de uma distância igual ao comprimento do esporão. Por atualizar a batimetria e considerar efeitos de refração da onda, no LTC existe uma diferença significativa na largura de praia quando comparado com o modelo analítico, para ambas as escalas consideradas (protótipo e modelo) e ambos os valores do coeficiente de transporte sedimentar.

Existe uma grande diversidade de expressões para o cálculo do valor de k , associados a um valor da dimensão dos sedimentos, a características de agitação e ainda a determinações empíricas. Apesar da variabilidade dos possíveis valores de k , segundo o LTC e a formulação analítica de Pelnard-Considère (1956) este parâmetro apenas afeta a rapidez do alcance da linha de costa a uma determinada posição, não afetando a sua configuração geométrica. Quanto maior for o valor de k , mais rápido a linha de costa alcança uma determinada posição.

A posição de linha de costa obtida para dois valores de k , calculada para o tempo de enchimento respectivo, permite a obtenção de duas linhas de costa sobrepostas, quando calculadas pela formulação analítica, ou quase sobreposto no modelo numérico.

Com base nas análises de sensibilidade ao modelo numérico LTC conclui-se que, a diversidade de variáveis a considerar no modelo LTC permite ainda explorar novos desempenhos.

A partir dos ensaios realizados em laboratório, numa praia sem a presença de um esporão, identifica-se a estabilização da geometria do perfil. Verificou-se uma diminuição das taxas das diferenças médias das cotas dos perfis monitorizados, sendo este um fator indicador de equilíbrio. O que foi referido anteriormente, permite a identificação do equilíbrio da praia e a consequente obtenção da geometria do perfil de equilíbrio para as condições de agitação e propriedades do modelo. O perfil de equilíbrio definido possui uma boa aproximação ao perfil de Dean, para um valor de $m=2/3$.

Os ensaios laboratoriais realizados para uma praia com esporão, não permitiram a identificação do tempo de enchimento do esporão, já que a situação inicial se afastou muito

da prevista, levando a que a linha de costa sofresse poucas alterações ao longo do ensaio. No entanto, tal como na praia sem esporão, foi possível identificar uma geometria de equilíbrio para os perfis transversais analisados, a partir de uma diminuição das taxas médias das diferenças de cotas e da estabilização dos valores das áreas dos perfis. Observou-se a existência de uma berma emersa e de uma berma submersa, bem como a presença de correntes de retorno ao longo da extensão da praia, não se tendo observado a presença de correntes de retorno imediatamente a sotamar do esporão (não se identificou projeção de sedimentos para fora do perfil ativo). O facto de não se terem registado correntes de retorno poderá dever-se ao comprimento reduzido do esporão (Basco, 2006). Os perfis finais obtidos apresentam maiores diferenças relativamente ao perfil de equilíbrio de Dean, quando comparadas com o cenário da praia sem esporão.

Apesar de se ter realizado alimentação de sedimentos a barlamar da praia não se encontrou uma relação direta com as taxas de variação da área dos perfis, retratando os fenómenos de acreção (positivas) e erosão (negativas) com os instantes onde se procedeu à alimentação. Em todos os ensaios laboratoriais realizados identificou-se a não estabilização de todos os pontos constituintes dos perfis.

Os principais efeitos de laboratório relacionam-se com a reflexão junto aos limites físicos do tanque e a geração da ondulação, tendo estes alguma influência nos resultados finais, tal como os efeitos de escala.

7.2. Desenvolvimentos futuros

Sendo o esporão uma estrutura de defesa costeira predominante na costa Portuguesa, torna-se importante o estudo do seu impacto na praia, a barlamar e a sotamar da estrutura. Por isso, torna-se essencial um estudo da morfodinâmica da praia também a sotamar do esporão, com controlo da posição da linha de costa e da geometria dos perfis transversais, à semelhança do trabalho realizado para barlamar, nesta dissertação.

A comparação da evolução da largura emersa dos perfis, bem como da sua geometria, entre as formulações numéricas, analíticas e no modelo físico, de forma verificar a aproximação à realidade das formulações, não foi realizada. Isto deveu-se ao facto de em laboratório a praia não partir de uma situação inicial semelhante à modelada numericamente e analiticamente. Esta comparação é essencial para uma validação dos resultados obtidos em termos de evolução da praia ao longo do tempo.

Como referido por Lopez-Feliciano (2014), os esporões são intervenções cujo máximo rendimento é obtido quando efetivamente existe transporte sedimentar longitudinal suficiente. Como comprovado pelos resultados obtidos neste trabalho, quando há sedimentos disponíveis para transporte, existe um aumento da largura de praia a barlar. A existência de esporões em alguns trechos da costa Portuguesa deve ser repensada, devido à inexistência de transporte sólido e à consequente predominância de fenómenos de erosão. Este tipo de estruturas deveria ser aliada a outro tipo de intervenções como as alimentações artificiais (Galofré, 2012), podendo desacelerar ou evitar o recuo da linha de costa, aumentando a vida útil da alimentação artificial de uma forma eficaz.

A simplicidade da definição do perfil de equilíbrio por Dean (1977) é bastante vantajosa para o cálculo numérico, apesar da desvantagem da não representação das bermas emersas e submersas. A sua aproximação à realidade, como foi analisada neste trabalho, deverá ser aprofundada, estudando em laboratório outras praias com propriedades refletivas/dissipativas diferentes (alterando o valor do parâmetro de entrada m), nomeadamente a verificação da alteração dessas propriedades com a presença de estruturas de defesa costeira, bem como com outras características de agitação. A validade do perfil de Dean, face a condições irregulares de agitação, terá bastante interesse por se aproximar de uma situação mais realista de praia.

É essencial verificar a adequabilidade das expressões de transporte sólido longitudinal (Kamphuis, 1991 e CERC, 1984), pois o caudal sólido disponível é dos fatores mais determinantes para a definição da posição de linha de costa e geometria dos perfis transversais a curto e médio prazo, bem como para a definição do tempo de enchimento. O estudo da distribuição transversal do transporte sólido longitudinal, à semelhança do estudo realizado por Badiei *et al.* (1994), Bayram *et al.* (2001) e Kumar *et al.* (2003) originaria uma melhoria na compreensão do desenvolvimento da praia a barlar e sotamar dos esporões, verificando a validade da sugestão de Oliveira (1997), para a evolução do volume armazenado pelo esporão desde o instante da sua construção, bem como o desenvolvimento do caudal sólido que efetivamente passa para sotamar.

Tendo-se observado no caso de estudo definido, que a posição de linha de costa, para uma situação em equilíbrio, não parte da cabeça do esporão sugere-se um melhoramento no programa LTC, devendo este permitir que a linha de costa inicie o seu desenvolvimento a barlar numa posição diferente da cabeça do esporão.

A calibração do modelo numérico é essencial para a otimização dos resultados, garantindo uma correta aproximação à realidade. À semelhança do que foi feito por Szmytkiewicz *et al.* (2000) e Tomasicchio *et al.* (2011), dever-se-iam incorporar na calibração dados resultantes da monitorização do protótipo, bem como dos ensaios laboratoriais realizados neste trabalho, para uma total verificação da aproximação do modelo à realidade.

BIBLIOGRAFIA

Bibliografia

Antunes-Carmo, J. S. (2004). "Modelação em hidráulica fluvial e ambiente"; Imprensa da Universidade, Coimbra, 396 p.

Badiei, P., Kamphuis, J. W., Hamilton, D. G. (1994). "Physical Experiments on the Effects of Groins on Shore"; Proc. 24th Int. Conf. Coastal Eng, ASCE, New York, pp. 1782-1796.

Bailard, J.A. (1981). "An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach"; Journal of Geophysical Research, Vol. 86 No. CII., pp. 10938–10954 (citado em Silva, 2010 e Coelho, 2005).

Baptista, P., Coelho, C., Pereira, C., Bernardes, C., Veloso-Gomes, F. (2014). "Beach morphology and shoreline evolution: monitoring and modelling medium-term responses (Portuguese NW coast study site)"; Coastal Engineering, Vol. 84, pp. 23-37.

Basco, D.R. (2006). "Shore Protection Projects, Coastal Project Planning and Design"; Chapter V-3, Engineer Manual 1110-2-1100. Washington DC: U.S. Army Corps of Engineers (citado em Silva, 2010).

Bascom, W.N. (1951). "The Relationship between Sand Size and Beach-face Slope"; Transaction of the American Geophysics Union, Vol. 32, pp. 866-874 (citado em Komar, 1998 e Raquel, 2010).

Bayram, A., Larson, M., Miller, H. C., Kraus, N. C. (2001). "Cross-shore distribution of longshore sediment transport: Comparison between Predictive Formulas and Field Measurements"; Coastal Engineering, Vol. 44, Issue 2, pp. 79-99.

Bettencourt, P. (1997). "Notas para uma Estratégia de Gestão da Orla Costeira"; Colectânea de Ideias Sobre a Zona Costeira de Portugal, Associação Eurocoast-Portugal, pp. 265-283.

Bodge, K. R., Dean, R. G. (1987). "Short-term impoundment of longshore transport"; Proc., Coast. Sediments '87, ASCE, Reston, pp. 468–483 (Citado em Wang e Kraus, 1999)

Bodge, K. R., Kraus, N. C. (1991). "Critical examination of longshore transport rate magnitude"; Proc., Coast. Sediments '91, ASCE, Reston, pp. 139-155 (citado em Coelho, 2005).

Bowen, A. J., Inman, D. L. (1969). "Rip currents 2. Laboratory and field observations"; Journal of Geophysical Research - Oceans, Vol. 74, Issue 23, pp. 5479-5490 (citado em Rocha, 2011).

Bruun, P. (1954). "Coastal Erosion and Development of Beach Profiles"; Technical Memorandum n. 44, Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, 79 p. (citado em Coelho, 2005).

CERC (1984). "Shore Protection Manual"; Washington DC: U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering and Research center, U.S. Government Printing office (Citado em Silva, 2010 e Coelho, 2005)

Coelho, C. Taveira-Pinto, F., Veloso-Gomes, F. (2004). "Coastal evolution and coastal works in the southern part of Aveiro lagoon inlet, Portugal"; Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering, Lisboa, Portugal, pp. 3914-3926.

Coelho, C. (2005). "Riscos de Exposição de Frentes urbanas para diferentes Intervenções de Defesa costeira"; Tese de Doutoramento. Universidade de Aveiro, Portugal, 405p.

Coelho, C., Veloso Gomes, F., Silva, R. (2007). "Shoreline Coastal Evolution Model: Two Portuguese Case Studies"; Proceedings of the 30th International Conference, 4, San Diego, California, USA, pp. 3430-3441

Coelho, C., Silva, R., Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F. (2009). "Potential impacts of climate change on NW Portuguese coastal zones"; ICES Journal of Marine Science, Vol. 66, 1497–1507.

Coelho, C., Lima, M., Veloso-Gomes, F. (2013). "Relationship between cross-shore active profile and one-line shoreline evolution models performance"; Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65, pp. 2107-2112.

Dalrymple, R. A. (1989). "Physical Modelling of littoral Processes"; Recent advances in Gydraulic Physical Modelling, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp. 567-588 (citado em Silva, 2010).

Dean, R. G. (1977). "Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts"; Department of Civil Engineering, Ocean Engineering Report No. 12, University of Delaware, Newark, Delaware, 45. p.

Dean, R. G. (1985). "Physical Modeling of Littoral Processes"; Physical Modeling in Coastal Engineering Rotterdam, A. A. Balkema, The Netherlands, pp. 119-139.

Dias, J. M. A. (1997). "Gestão costeira e conhecimento científico - Uma perspetiva integrada"; Colectânea de ideias sobre a zona costeira de Portugal, Associação Eurocoast-Portugal, Instituto de água, pp. 231-232.

Galofré J., Ortiz, D., Medina, R. (2012). "Long Term Beach Erosion: Morphodynamic Case Study in Mont-Roig Beach, Spain"; Proc. of 33rd Conference on Coastal engineering, Santander, Spain, 13 p.

Gourlay, M. R. (1976). "Nonuniform alongshore currents"; in Proc. 15th Coastal Eng. Conf., Am. Soc. Civ. Eng., Honolulu, pp. 701-720.

Gravens, M. B., Kraus, N. C., Hanson, H. (1991). "GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change, Report 2"; Workbook and System User's Manual, U.S. Army Corps of Engineers, 431 p.

Hallermeier, R. J. (1978). "Uses for a Calculated Limit Depth to Beach Erosion"; Proceedings of 16th Coastal Engineering Conference, ASCE, Hamburg, Germany, pp. 1493-1512.

Hanson, H., Kraus, N. C. (1989). "GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change"; Report 1, Technical Reference, U.S. Army Corps of Engineers, 247 p.

Hanson, H., Kraus, N. C. (1991). "GENESIS - generalized model for simulating shoreline change"; Reference Manual and Users Guide, vol. 2, US Army Corps of Engineers, 431 pp.

Hanson, H., Kraus, C. (2004). "Advancements in One-Line Modeling of T-Head Groins: (Genesis-T)"; Journal of Coastal Research, Special Issue No. 33, pp. 315-323.

Hanson, H., Kraus, N. C. (2011). "Long-Term Evolution of a Long-Term Evolution model"; Journal of Coastal Research, Special Issue No. 59, pp 118-129.

Heller, V. (2011). "Scale effects in physical engineering models"; Journal of Hydraulic Research, Vol. 49, No. 3, pp. 293-306.

Hughes, S. A. (1983). "Movable-Bed Modeling Law for Coastal Dunes Erosion"; Journal of waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 109, No. 2, pp. 164-179 (Citado em Silva, 2010).

Hughes, S. A. (1993). "Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering"; Advances Series on Ocean Engineering, London, World Scientific, 245 p. (citado em Silva, 2010).

Kamphuis, J. W., Readshaw, J. S. (1978). "A model study of alongshore sediment transport rate"; Proc., 16th Coast. Engrg. Conf., ASCE. Reston, pp. 1656-1674.

Kamphuis, J.W. (1985). "On understanding Scale Effect in Coastal Mobile Bed Model"; Physical Modelling in Coastal Engineering. Rotterdam: A.A. Balkema, The Netherlands, pp. 141-162 (citado em Silva, 2010).

Kamphuis, J. W. (1991). "Alongshore Sediment Transport Rate"; Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 6, pp. 624-641.

Komar, P.D., Inman, D.L. (1970). "Longshore sand transport on beaches"; Journal of Geophysical Research, Vol. 75, No. 30, pp. 5514-5527.

Komar, P.D. (1998). "Beach processes and Sedimentation"; 2nd. New Jersey, USA, 544 p. (citado em Silva, 2010).

Kraus, N. C., Larson, M., Randall, A. W. (1998). "Depth of Closure in Beach-fill Design"; Coastal Engineering Technical Note – CETN II-40, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal and Hydraulics Laboratory, 13 p. (citado em Coelho, 2005).

Kumar, V.S., Anand, N.M., Chandaramohan, P., Naik, G.N. (2003). "Longshore sediment transport rate - measurements and estimation Central West Coast of India"; Coastal Engineering Vol. 48, pp. 95–104.

Le Méhauté, B. (1970). "A Comparison of Fluvial and Coastal Similitude"; In 12th International conference on Coastal Engineering 2, ASCE, pp. 1077-1096 (Citado em Silva, 2010).

Lopez-Feliciano, O. L. (2014). "Implementation of CMS high resolution model to study morphology change in a groin field during hurricane Sandy"; Tese de Mestrado, Stevens Institute of Technology, United States of America, 128 p.

Miller, H. C. (1998). "Comparison of storm longshore transport rates to predictions"; Proceedings of the 26th Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp. 2954-2967.

Mogridge, G. R., Kamphuis, J. W. (1972). "Experiments on bed form generation by wave action"; In 13th International Conference on Coastal Engineering, 2, pp. 1142-1223, American Society of Civil Engineers.

Morais, L. M. F. (2010). "Efeitos de escala associados à modelação física de geocontentores"; Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 120 p.

Morang, A., Parson, L. E. (2002). "Coastal morphodynamics"; Coastal Engineering Manual, Part IV, Coastal Geology, Chapter IV-3, Engineer Manual 1110-2-1100, Morang, A. (editor), U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 86 p. (Citado em Coelho, 2005)

Novais-Barbosa, J. (1985). "Mecânica dos fluídos e hidráulica geral"; Porto, Porto Editora, 479 p. (citado em Silva, 2010)

Oliveira, I. B. M. (1997). "Proteger ou não proteger ou sobre a viabilidade de diferentes opções face à erosão da costa oeste Portuguesa"; Colectânea de Ideias Sobre a Zona Costeira de Portugal Associação Eurocoast-Portugal, pp. 205-227.

Oumeraci, H (1999). "Strengths and limitations of physical modelling in coastal engineering - Synergy Effect with numerical Modelling and Field Measurement"; In HYDRALAB-Workshop, Hannover, Germany, pp. 7-38 (citado em Silva, 2010).

Ozhan. E. (1982). "Laboratory study of breaker type effect on longshore sand transport"; Mech. of Sediment Transport Proc., Euromech, Vol. 156, B. M. Sumer and A. Muller, eds, pp. 265-274 (Citado em Wang e Kraus, 1999).

Pattiaratchi, C., Olsson, D., Hetzel, Y., Lowe, R. (2009). "Wave-driven circulation patterns in the lee of groynes"; *Continental Shelf Research*, Vol. 29, pp. 1961-1974.

Pelnard-Considère, R. (1956). "Essai de Theorie de l'Evolution des Forms de Rivages en Plage de Sable et de Galets"; *Fourth Journees de l'Hydraulique, les Energies de la Mer, Question III, Rapport n. 1*, pp. 289-298 (citado em Dean, 2002, Coelho, 2005, e Raquel, 2010).

Ranasinghe, R., Turner, I. L., Symonds G. (2006). "Shoreline response to multifunctional artificial surfing reefs: A numerical and physical modelling study"; *Coastal Engineering*, Vol. 53, Issue 7, pp. 589-611.

Roberts, T. M., Wang, P., Kraus, N. C. (2007). "Limits of Beach and Dune Erosion in Response to Wave Runup Elucidated From SUPERTANK"; In *Coastal Sediments '07*, reston, ASCE, pp. 1961-1974.

Rocha, M. V. L. M. (2011). "Numerical Modelling of Groin Impact on Nearshore Hydrodynamics"; *Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro. Aveiro, Portugal*, 43 p.

Rosati, J. D., Walton, T., Bodge, K. (2002). "Longshore Sediment Transport"; *Coastal Engineering Manual, Part III, Coastal Sediment Processes, Chapter III-2, Engineer Manual 1110-2-1100*, Morang, A. (editor), U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 113 p. (citado em Coelho, 2005).

Schoonees, J. S., Theron, A. K. (1993). "Review of the field data base for longshore sediment transport"; *Coastal Engineering*, Vol. 19, Issues 1-2, pp. 1-25.

Schoonees, J. S., Theron, A. K. (1994). "Accuracy and applicability of the SPM longshore transport formula"; *Proceedings of the 24th Coastal Engineering Conference*, ASCE, pp. 2595-2609.

Silva, R. (2010). "Avaliação Experimental e Numérica de Parâmetros Associados a Modelos de Evolução da Linha de Costa"; Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 397 p.

Smith, E.R., Wang, P., Zhang (2003). "Evaluation of the CERC formula using large-scale model data"; U.S. Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, 13 p.

Szmytkiewicz, M., Biegowski, J., Kaczmarek, L. M., Ostrowski, R., Pruszek, Z., Różyński, G., Skaja, M. (2000). "Coastline changes nearby harbour structures: comparative analysis of one-line models versus field data"; Coastal Engineering, Vol. 40, pp. 119-139.

Taveira-Pinto, F., Lopes, H. G., Veloso-Gomes, F., Santos, P. R. (2007). "A importância da modelação física como tecnologia de informação para a engenharia marítima"; Tecnologias de la Información y las Comunicaciones en la Ingeniería Civil, Capítulo 9; Instituto de hidráulica e Recursos Hídricos (IHRH), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, pp. 193-214.

Tomasichio, G. R., D'Alessandro, F., Barbaro, G. (2011). "Composite modelling for large scale experiments on wave-dune interactions"; Journal of Hydraulic Research Vol. 49, No. S1, pp 15-19.

Valle, R.; Medina, R., Losada, M. A. (1993). "Dependence of the coefficient K on the grain size"; Technical Note N. 3062, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 119, No. 5, pp. 568–574 (citado em Coelho, 2005).

Van Rijn, L. C. (1984). "Sediment transport." Journal of hydraulic engineering, Vol. 110, No 11, ASCE, , pp. 1432-1456, 1613-1641 e 1733-1754.

Van Rijn, L. C. (2011). "Coastal Erosion and Control"; Ocean and Coastal Management, Vol. 54 No. 12, pp. 867-887.

Vellinga, P. (1982). "Beach and Dune Erosion during Storm Surges"; Coastal Engineering, Vol. 6, No. 4, pp. 361-387 (citado em Silva, 2010).

Veloso-Gomes, F. (1995). "Fenómenos de Alteração e Deformação da Agitação na Propagação em Direção à Costa - Interação Agitação/Taludes"; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Laboratório de Hidráulica, 76 p.

Visser, P. J. (1991). "Laboratory Measurements of Uniform Longshore Currents"; Coastal Engineering, Vol. 15, pp. 563-593 (citado em Silva, 2010).

Vitale, P. (1981). "Movable-bed laboratory experiments comparing radiation stress and energy flux factor as predictors of longshore transport rate"; 1 Misc. Rep. No. 81-4, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Miss., 94 p.

Wang, H., Toue, T., Dette, H. H. (1990). "Movable Bed Modeling Criteria for Beach Profile Response"; In 22nd International Conference on Coastal Engineering, Delft, The Netherlands, pp. 2566-2579.

Wang, P., Kraus, N. C., Davis, R. A., Jr. (1998). "Total rate of longshore sediment transport in the surf zone: field measurements and empirical predictions"; Journal of Coastal Research, Vol. 14, No. 1, pp. 269-283.

Wang, P. and Kraus, N. C. (1999). "Longshore sediment transport rate measured by short-term impoundment"; Journal of Waterway, Port, Coastal & Ocean Engineering, ASCE, Vol. 125, pp. 118-126.